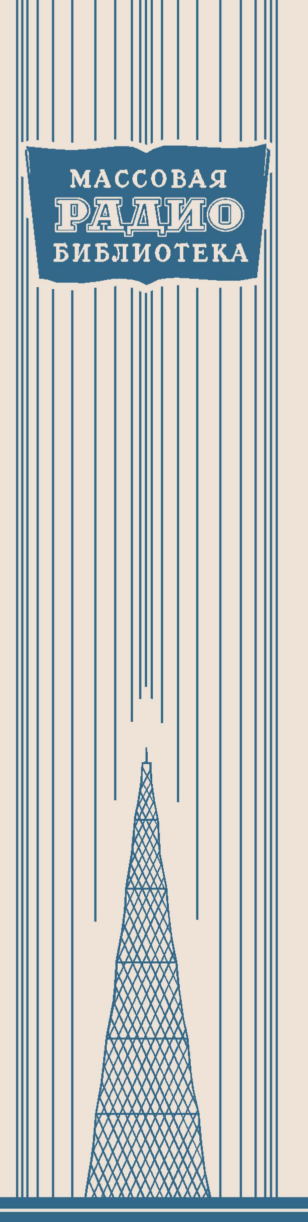
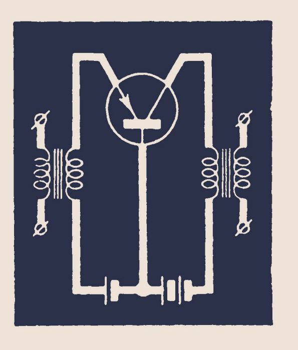


Я. А. ФЕДОТОВ

КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ТРИОДЫ





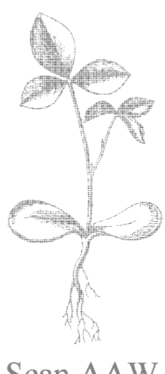
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 216

Я. А. ФЕДОТОВ

КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ТРИОДЫ







ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1955 ЛЕНИНГРАД

В книге, рассчитанной на подготовленных радиолюбителей, изложены физические основы и принципы действия кристаллических триодов, указаны области их применения, рассмотрены радиотехнические схемы с кристаллическими триодами.

Автор *Федотов Яков Андреевич*
КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ТРИОДЫ

Редактор *Куликовский А. А.* Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*

Сдано в набор 29/X 1954 г. Подписано к печати 7/II 1955 г.
Бумага 84×108[1]/[32] Печатн. л. 4,92 Уч.-изд. л. 5,5
Т-00877 Тираж 25 000 экз. Цена 2 р. 20 к. Заказ 1453

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

После того как 7 мая 1895 г. А. С. Поповым были произведены первая передача и прием сигналов по радио, радиотехника, в развитии которой ведущее место занимали русские ученые, начала развиваться быстрыми темпами.

Одним из важнейших элементов в радиоприемных устройствах того времени являлся кристаллический диод, т. е. кристалл, выполнявший в паре с контактной пружинкой роль нелинейного элемента — детектора. Кристаллический детектор был применен для приема телеграфных сигналов искрового радиопередатчика впервые в 1900 г. А. С. Поповым. Впоследствии А. С. Попов применил кристаллический детектор также и для приема радиотелефона.

В 1922 г. в первом советском Научно-исследовательском радиотехническом институте — Нижегородской радиолаборатории имени В. И. Ленина — сотрудник этой лаборатории О. В. Лосев, работавший под руководством М. А. Бонч-Бруевича обнаружил, что ряд кристаллических диодов обладает падающими вольтамперными характеристиками. Такие диоды с падающими характеристиками были использованы О. В. Лосевым для генерирования незатухающих колебаний и для регенеративного приема. Введение в антенный контур приемника кристаллического диода, поставленного в режим, близкий к самовозбуждению, значительно увеличивало силу принимаемых сигналов. Дальнейшими работами О. В. Лосева и С. И. Шапошникова в этой области была доказана и практически осуществлена возможность гетеродинного приема при помощи генерирующих кристаллов. Кроме того, оказалось возможным такой приемник превратить в передатчик, обеспечивающий связь на небольшие расстояния. Приемники с генерирующими кристаллами были просты, дешевы и потребляли незначительные мощности при малых напряжениях источников питания. Так впервые в мире полупроводниковые кристаллы были применены для целей усиления и генерирования незатухающих колебаний.

Впоследствии электровакуумная лампа в процессе своего развития вытеснила кристалл из ряда областей радиотехники. Однако ученые продолжали неустанно работать над исследованием свойств кристаллов. Большая работа в этой области была проделана О. В. Лосевым, который оставил 12 авторских свидетельств на изобретения и большое количество печатных трудов о свойствах полупроводников.

Сходство вольтамперных характеристик кристаллического и вакуумного диодов неоднократно наводило ученых на мысль ввести в кристаллический диод дополнительный электрод, действие которого было бы равносильно действию управляющей сетки вакуумного триода.

Во второй половине 1948 г. появились впервые сведения о кристаллическом триоде, как об устройстве с тремя выводами, которое может быть использовано для усиления сигналов. Впоследствии в результате многочисленных экспериментов и теоретических исследований был выявлен ряд новых свойств полупроводников и разработаны новые типы кристаллических триодов.

Значительный интерес к кристаллическим триодам, проявляемый в последнее время, объясняется их особенностями, которые выгодно отличают их от вакуумных ламп. К числу достоинств кристаллических триодов в первую очередь следует отнести их значительный по сравнению с вакуумными лампами срок службы, высокую механическую прочность, малые размеры, малые потребляемые мощности. Возможность работы с малыми постоянными составляющими токов и напряжений допускает снижение веса и габаритов аппаратуры с кристаллическими триодами как за счет уменьшения источников питания, так и за счет применения малогабаритных радиодеталей, рассчитанных на малые мощности постоянных составляющих. Вместе с тем по сравнению с радиолампами кристаллические триоды имеют и ряд существенных недостатков — ограниченную область рабочих частот, более высокий уровень шумов, сильный разброс параметров у отдельных экземпляров, ограниченные полезные мощности. Однако эти недостатки успешно преодолеваются по мере усовершенствования технологии производства кристаллических триодов.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ТРИОДА

1. ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

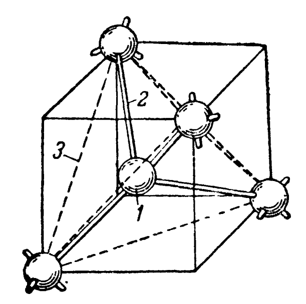
Все вещества, обладающие кристаллической структурой, в зависимости от их способности проводить электричество могут быть разделены на три группы: проводники, полупроводники и изоляторы, или диэлектрики, причем полупроводники являются самой обширной группой. Величина удельной проводимости полупроводников значительно отличается от величины удельной проводимости проводников. Однако основная разница между полупроводниками и проводниками, а также между полупроводниками и диэлектриками состоит в качественной природе проводимости, которая определяет и величину проводимости.

Если проводимость проводников (металлы) может быть объяснена тем, что в металлах валентные электроны свободны и движутся подобно атомам газа, то в полупроводниках валентные электроны, как правило, связаны и не могут принимать участия в осуществлении проводимости. Рассмотрим, как осуществляется проводимость в полупроводниках на примере таких однотипных полупроводников, как алмаз (углерод), кремний и германий.

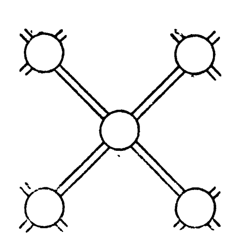
Атомы углерода, кремния и германия имеют на внешней орбите по четыре электрона, которые определяют способность атомов вещества вступать в связь между собой или с атомами другого вещества. Это — так называемые валентные электроны. В кристаллической решетке вещества каждый из атомов стремится занять такое положение, в котором он был бы связан с четырьмя другими атомами, расположенными симметрично относительно него. Эти соседние атомы располагаются по вершинам правильного тетраэдра, в центре которого расположен рассматриваемый атом (фиг. 1). Каждая из связей между атомами образована дву-

мя электронами, из которых один принадлежит к числу четырех валентных электронов одного атома, а другой — к числу валентных электронов другого. Кристаллическая решетка рассматриваемых полупроводников состоит из большого количества таких тетраэдров, которые различным образом соединяются между собой при помощи таких же парноэлектронных связей.

Для простоты перейдем от трехмерной пространственной решетки к двухмерной плоскостной, изображенной на фиг. 2. Будем считать, что на плоскости изображена кристалличе-



Фиг. 1. Элементарная ячейка кристалла.
1 — атом; *2* — парноэлектронная связь; *3* — ребро тетраэдра.



Фиг. 2. Плоскостное изображение кристаллической решетки.

ская решетка алмаза, в которой каждый из атомов связан четырьмя парноэлектронными связями с соседними атомами. Можно сразу сказать, что при таком строении, когда все валентные электроны являются связанными, кристалл должен быть изолятором. И это справедливо, но до тех пор, пока не нарушена целость кристаллической решетки и сам кристалл чист от примесей.

Допустим, что кристалл подвергнут световому облучению или бомбардировке какими-либо частицами, обладающими значительной энергией. Кванты излучения или частицы, попадая в кристалл, могут нарушить целость связи, выбив из нее электрон. Так как сообщенной энергией электрон может быть не только выбит из связи, но и удален от нее на некоторое расстояние, то он начнет беспорядочное тепловое движение внутри кристалла, которое будет продолжаться до тех пор, пока он не попадет обратно в свою связь или в какую-либо другую связь, в которой также отсутствует электрон. Если поместить кристалл в электрическое поле, то такой электрон, выбитый из своей связи, будет упорядочен-

но двигаться под действием поля, что равносильно протеканию через кристалл электрического тока. Перенос заряда осуществляется в этом случае свободно передвигающимся электроном. Такие свободные электроны называются избыточными электронами, а создаваемая ими проводимость называется электронной или проводимостью типа n (от латинского слова «negative» — «отрицательный»).

Теперь рассмотрим ту связь, из которой был удален один электрон. После удаления электрона в этом месте остался ненейтрализованный положительный заряд, который называется «дыркой». Такой заряд может быть нейтрализован электроном, перешедшим в эту связь из соседней. При этом в соседней связи будет недостаток одного электрона, т. е. дырка перекочует в соседнюю связь, и т. д. Дырка, так же как и электрон, будет совершать беспорядочное тепловое движение до тех пор, пока не рекомбинирует со свободно движущимся электроном. При помещении кристалла в электрическое поле движение дырки тоже становится упорядоченным, что также соответствует протеканию через кристалл тока, однако в этом случае носителем заряда будет положительный заряд — дырка, движение которой будет совершаться в направлении, противоположном движению электрона. Такая проводимость называется дырочной или проводимостью типа p (от латинского слова «positive» — «положительный»).

Несмотря на то, что дырочная проводимость рассматривается как проводимость движения положительных зарядов, ее никак нельзя отождествлять с проводимостью ионной. В действительности и при дырочной проводимости перемещаются электроны, только не один свободный электрон проходит весь путь, как это имеет место при электронной проводимости, а большое количество электронов поочередно заменяют друг друга в связях.

Суть различия проводимости дырочной и проводимости электронной может быть пояснена на основании такой аналогии.

По пустому наклонному жолобу спущен шар, который скатывается сверху вниз. Шар является аналогом электрона, а поле тяготения — аналогом электрического поля. Весь пример является аналогией электронной проводимости.

Если теперь наклонный жолоб доверху наполнить шарами и затем убрать нижний шар, то его место будет тут же занято следующим за ним шаром, освободившееся после него место будет занято третьим снизу шаром и т. д. Все

шары сдвинутся вниз, а пустое место (аналог дырки), образовавшееся внизу после удаления нижнего шара (аналогия с удалением электрона из связи), переместится в крайнее верхнее положение. Данный пример является аналогией дырочной проводимости.

Возвратимся к рассматриваемому примеру. При освещении кристалла алмаза или при бомбардировке его какими-либо частицами ряд валентных связей разрывается, давая одинаковое число дырок и свободных электронов. Если этот освещенный кристалл поместить в электрическое поле, то в нем потечет ток, причем в одну сторону будет направлен поток дырок, а в другую поток электронов, т. е. кристалл будет одновременно обладать двумя типами проводимости— электронной и дырочной. Если убрать источник света, то кристалл вследствие рекомбинации дырок с электронами (которая теперь не компенсируется появлением новых дырок и электронов) придет в свое первоначальное состояние. Количество возникающих в единицу времени пар дырок и свободных электронов зависит от интенсивности облучения. Этот эффект не используется в кристаллических триодах, ибо для них необходимо, чтобы используемый кристалл обладал каким-либо одним из типов проводимости: либо дырочной, либо электронной. Однако описанный эффект широко используется в кристаллических фотоэлементах или, как их иначе называют, в фотоусилителях.

Разрыв связей может произойти не только в результате облучения или бомбардировки частицами, но и при повышении температуры. Это явление не имеет почти никакого значения для алмаза, ибо наступает при очень высоких температурах, но для кремния и в особенности для германия оно имеет очень большое значение, так как наступает при температурах, с которыми можно столкнуться на практике. В этом случае, как и в рассмотренном выше, в полупроводнике возникает равное число дырок и свободных электронов, так как при разрыве связей они возникают парами.

Картина будет совершенно иной, если вместо свободного от примесей полупроводника мы будем рассматривать полупроводник с примесями.

Примесные атомы в зависимости от характера примеси могут иметь число валентных электронов как больше, так и меньше четырех. Попадая в кристалл, они занимают в кристаллической решетке места, обычно занимаемые атомами вещества полупроводника, и образуют связи с соседними атомами. В зависимости от того, имеет ли примесный атом

избыток или недостаток электронов, он будет создавать электронную или дырочную проводимость.

Допустим, что примесным является пятивалентный атом мышьяка, а основным веществом кристалла кремний. Атом мышьяка, заняв в кристаллической решетке место атома кремния, за счет четырех электронов на своей внешней орбите образует связи с соседними атомами кремния. Пятый электрон внешней орбиты мышьяка не может занять место в связи, так как все места в связях заполнены. Силы притяжения стремятся его удержать возле своего атома. Однако уже при комнатной температуре за счет энергии теплового движения электрон отрывается от своего атома и получает возможность передвижения в кристалле, т. е. становится свободным электроном. При этом атом мышьяка становится носителем неподвижного положительного заряда. При низких температурах свободный электрон может быть притянут таким положительным зарядом и связан с ним. Чем ниже температура, тем легче рекомбинируют электроны с примесными атомами и тем труднее оказывается оторвать электрон от своего примесного атома. Примесные атомы, дающие свободные электроны и обеспечивающие электронную проводимость, называют донаторами. Донаторными примесями являются: фосфор, мышьяк, сурьма. Кристалл с преобладанием донаторных примесей обладает электронной проводимостью и называется кристаллом типа n.

Если теперь рассмотреть кремний с примесью трехвалентного бора, имеющего на внешней орбите три электрона, то станет очевидным, что бор, занимая место кремниевого атома и образуя связи с соседними атомами, может образовать только три полноценные связи. В четвертой связи будет отсутствовать один электрон, что соответствует появлению дырки в кристаллической решетке. В эту связь может перейти электрон из соседней связи, тогда все связи атома бора будут заполнены, но дырка перейдет в другую связь. Атом бора станет при этом носителем неподвижного отрицательного заряда.

Исходя из аналогии между движением электрона и дырки, можно предполагать, что отрицательно заряженный атом бора притянет к себе положительно заряженную дырку. Однако при комнатной температуре дырка, так же как и электрон, за счет энергии теплового движения отрывается от своего примесного атома и может осуществлять процесс проводимости. Примеси, атомы которых принимают в свои связи дополнительный электрон, называют акцепторными

примесями. Акцепторные примеси делают кристалл обладающим дырочной проводимостью. Такой кристалл называется кристаллом типа p.

Выше уже было сказано, что как на отрыв дырки от атома акцептора, так и на отрыв электрона от атома донатора необходима затрата некоторого количества энергии. Именно поэтому проводимость полупроводника в значительной степени зависит от окружающей температуры. С повышением температуры число электронов или дырок, оторвавшихся от своих примесных атомов, все более и более превышает число рекомбинирующих с этими атомами дырок или электронов, что соответствует повышению проводимости кристалла. При достаточно высокой температуре с рекомбинацией можно практически не считаться. На этом рост проводимости с температурой должен был бы остановиться. Однако при достаточном повышении температуры начинают нарушаться валентные связи в кристалле. При этом электроны и дырки появляются парами в количестве, все возрастающем с ростом температуры. Доля примесной проводимости в суммарной проводимости быстро падает и кристалл приобретает в равной степени как дырочную, так и электронную проводимости, величина которых практически уже не зависит ни от типа, ни от концентрации примеси. Такая проводимость кристалла называется собственной.

Для кремния было экспериментально установлено, что энергия разрыва связи равняется 1,11 *эв* (электрон-вольта), энергия отрыва дырки от акцептора — 0,08 *эв*, энергия отрыва электрона от донатора — 0,054 *эв*.

Итак, в зависимости от типа и концентрации примеси кристалл обладает тем или иным типом проводимости и той или иной величиной удельной проводимости.

Кристаллы, обладающие проводимостью одного типа, а также кристаллы, обладающие в одном объеме несколькими слоями с поочередно сменяющимся типом проводимости, используются для изготовления кристаллических триодов.

2. КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ТРИОД С ТОЧЕЧНЫМИ КОНТАКТАМИ

Самым простым типом кристаллического триода является конструкция, в которой к одному полупроводниковому кристаллу присоединены две контактные пружинки такого же вида, как и контактные пружинки кристаллического диода. Чаще всего кристалл берется германиевый с электронной проводимостью (т. е. германий типа n). Кристалл на

большой (по сравнению с площадью точечных контактов) поверхности припаивается к массивному металлическому основанию или цоколю. Острия контактных пружинок помещаются на поверхности кристалла германия на очень малом расстоянии друг от друга (порядка сотых долей миллиметра).

Массивный цоколь и две контактные пружинки являются тремя выводами кристаллического триода, при помощи которых он может быть включен в схему, подобно тому как включается в схему обычный триод с тремя выводами: катодом, сеткой и анодом.

Тип проводимости определяет отношение полупроводника к контактной пружинке: направление прямого и обратного тока через полупроводник, полярность напряжения источников питания и смещения.

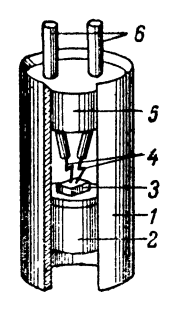
При соответствующем включении кристаллического триода в схему с источниками питания и смещения одна из контактных пружинок может эмиттировать вглубь германиевого кристалла с электронной проводимостью поток дырок. В силу этого свойства данная пружинка называется эмиттером. Она исполняет функции, аналогичные функциям катода электровакуумного триода. Если используется кристалл германия с дырочной проводимостью, то эмиттер будет эмиттировать внутрь кристалла уже не поток дырок, а поток электронов. Естественно, что при этом полярность источников питания и смещения должна быть изменена на обратную.

Вторая контактная пружинка включается в направлении обратного тока кристалла и находится, таким образом, под потенциалом, противоположным по знаку зарядам, эмиттируемым эмиттером в кристалл. Так как острия обеих пружинок расположены очень близко друг от друга, то основная часть потока зарядов, эмиттированного в кристалл, попадает на вторую пружинку, называемую коллектором, и лишь незначительная часть зарядов рекомбинирует внутри кристалла и ответвляется в направлении цоколя, который часто называют основным электродом или основанием.

Потенциалом основания (основного электрода) относительно эмиттера определяется величина того потока зарядов, который эмиттируется в кристалл, поэтому основание или основной электрод будем впредь называть управляющим электродом; его действие аналогично действию сетки в вакуумном триоде. Аналогом коллектора в вакуумном триоде является анод.

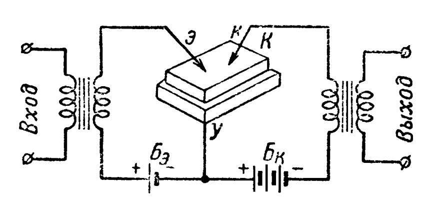
Устройство такого кристаллического триода показано на фиг. 3.

Предположим, что кристаллический триод собран на кристалле германия с электронной проводимостью. Схема включения такого кристаллического триода с германием типа n приведена на фиг. 4. В этой схеме общим электродом является управляющий электрод. На эмиттер подается не-



Фиг. 3. Кристаллический триод патронного типа.

1—металлическая гильза; 2 — металлическое основание; 3 — кристалл; 4 — контактные пружинки эмиттера и коллектора; 5— изоляционная пробка; 6 — выводы эмиттера и коллектора.



Фиг. 4. Включение кристаллического триода в схему.

К — кристалл германия; у — управляющий электрод; э — эмиттер; к — коллектор.

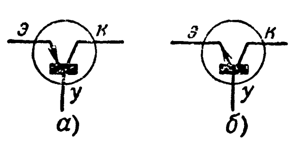
большое положительное смещение относительно управляющего электрода. В цепь эмиттера последовательно со смещающим напряжением подается переменное напряжение сигнала. Между управляющим электродом и коллектором включается источник напряжения питания. Полярность его выбирается так, что коллектор оказывается под отрицательным напряжением относительно управляющего электрода. В цепь коллектора включается сопротивление нагрузки, с которого снимается усиленное напряжение сигнала.

Принципы работы кристаллического и вакуумного триодов имеют много общего. Эмиттер посылает поток зарядов внутрь кристалла подобно тому, как накаленный катод вакуумного триода эмиттирует в вакуум поток электронов. Управляющий электрод имеет большое сходство в принципе работы с управляющей сеткой вакуумного триода, ибо разностью потенциалов между управляющим электродом и эмиттером определяется интенсивность эмиссии зарядов в полупроводник.

Коллектор собирает поток зарядов, эмиттированных вглубь полупроводника, подобно аноду вакуумного триода. Так как в кристаллических триодах в зависимости от типа

проводимости полупроводника эмиттируемые заряды могут иметь либо положительный, либо отрицательный знак, источники питания в цепи коллектора и смещения в цепи эмиттера должны иметь ту или иную полярность.

С точки зрения включения в схему кристаллический триод также имеет много общего с вакуумным триодом. Типовая схема включения кристаллического триода с общим управляющим электродом аналогична включению вакуумного триода по схеме с общей сеткой. Обе эти схемы не создают изменения фазы выходного сигнала относительно фазы входного сигнала на 180°. Схема с общим эмиттером аналогична схеме с общим катодом, они изменяют фазу сигнала на 180°. Кристаллический триод, включенный по схеме с общим коллектором, имеет много общего с катодным повторителем, т. е. со схемой включения вакуумного триода с общим анодом.



Фиг. 5. Условные обозначения кристаллических триодов.

а — триоды с германием типа n; *б* — триоды с германием типа p.

Таким образом, кристаллический триод с некоторыми ограничениями можно рассматривать как вакуумный триод, катод которого обладает способностью эмиссии при комнатной температуре и может эмиттировать положительные (в германий типа n) или отрицательные (в германий типа p) заряды.

Для изображения кристаллических триодов на принципиальных схемах будем пользоваться условными обозначениями триода, приводимыми на фиг. 5. Здесь стрелка обозначает эмиттер, причем она ставится в направлении пропускания.

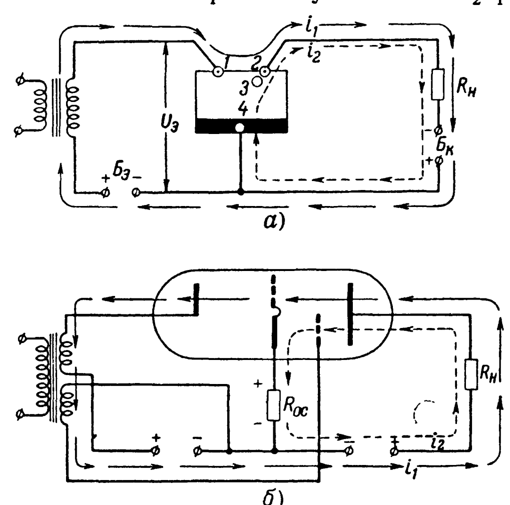
Для лучшего понимания принципа действия кристаллического триода точечного типа можно привести следующую аналогию между кристаллическим триодом и вакуумным триодом.

На фиг. 6,*а* изображен схематически точечный триод. Рассмотрим отдельно ток i_1 в цепи эмиттер—коллектор (показан сплошными стрелками) и ток i_2 в цепи управляющий электрод — коллектор (показан пунктирными стрелками).

Ток i_1 протекает под действием источника $Б_к$. Величина его определяется напряжением смещения. С точки зрения цепи эмиттер—коллектор действие точечного триода полностью аналогично действию вакуумного триода, включенного с общей сеткой: изменение напря-

жения между эмиттером и управляющим электродом на $\Delta u_э$ приводит к изменению тока эмиттера на Δi_1.

В цепи управляющий электрод — коллектор за счет того же источника $Б_к$ протекает обратный ток кристалла i_2. В силу особых условий в области непосредственно под коллектором изменение тока i_1 на величину Δi_1 вызывает пропорциональное изменение тока i_2 на величину Δi_2. Это явление можно представить себе таким образом: в некоторой точке *3* вблизи коллектора на пути тока i_2 расположен



Фиг. 6. Аналогия между кристаллическим и вакуумным триодами.

а — схематическое изображение кристаллического триода; *б* — вакуумная модель кристаллического триода.

некоторый условный управляющий электрод, связанный с входом и реагирующий на изменения напряжения на входе. Изменение напряжения на входе на $\Delta u_э$ вызывает посредством истинного управляющего электрода изменение тока i_1 на величину Δi_1 и посредством условного управляющего электрода — изменение тока i_2 на величину Δi_2.

Таким образом, точечный кристаллический триод можно рассматривать как своеобразную двухкаскадную схему, в которой оба каскада работают на общую нагрузку $R_н$. Ток i_2, протекая через кристалл, вызывает в нем некоторое падение напряжения, действующее

между эмиттером и управляющим электродом. Это напряжение является напряжением обратной связи, подаваемым с выхода второго каскада на вход первого каскада. Это своеобразие точечного триода делает его особенно удобным для использования в импульсных схемах.

Следует заметить, что изменение входного напряжения на $\Delta u_э$ приводит к изменению входного тока i_1 на величину Δi_1, тогда как ток на выходе $(i_1 + i_2)$ изменяется на величину $(\Delta i_1 + \Delta i_2)$.

Отношение изменения выходного тока к изменению входного при неизменном напряжении на выходе называется коэффициентом усиления по току:

$$\alpha = \left| \frac{\Delta i_1 + \Delta i_2}{\Delta i_1} \right|_{u_к = \mathrm{const}}.$$

На фиг. 6,*б* изображена вакуумная ламповая схема, отражающая описанные выше процессы в кристаллическом триоде.

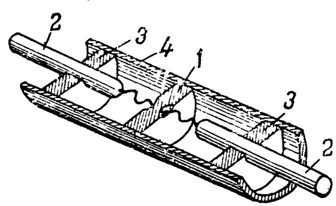
Оба триода имеют общий анод (коллектор) и работают на общую нагрузку. Обе сетки работают от одного и того же сигнала (управляющий электрод и условный управляющий электрод); сетка первого каскада соединена с катодом второго каскада (управляющий электрод является сеткой для первого каскада и катодом для второго каскада). В цепь общего электрода включено сопротивление R_{oc}, имитирующее внутреннее сопротивление обратной связи кристаллического триода, напряжение на котором развивается за счет тока второго каскада.

Такая аналогия не отражает полностью всех физических процессов в кристалле и в области контактов и дается исключительно для иллюстрации принципа действия точечного триода.

Рассматриваемые ниже слоистые триоды не имеют вторичных процессов в области коллектора (если в слоистом триоде не предусмотрено дополнительных переходов типа p—n), поэтому их аналогия с вакуумной лампой будет гораздо ближе, так как она ограничивается только первым каскадом.

Не останавливаясь дальше на работе кристаллического триода и методах включения его в схему, разберем некоторые варианты конструктивного выполнения кристаллических триодов с точечными контактами.

Рассмотренный кристаллический триод является по своей конструкции триодом патронного типа. В большинстве случаев такие триоды имеют два вывода: эмиттер и коллектор. Управляющий электрод (основание) соединен непосредственно с латунной гильзой, в которой собирается триод. Острия контактных пружинок в таких триодах помещаются на расстоянии 0,05—0,07 *мм* друг от друга. Для придания контактам устойчивости при механических сотрясениях и для предотвращения сдвига пружинок на полированной поверхности кристалла за счет тангенциальной составляющей силы давления внутренняя часть гильзы заполняется парафином или каким-либо иным вязким диэлектриком.



Фиг. 7. Коаксиальный кристаллический триод.

1 — кристалл в оправке; *2* — выводы эмиттера и коллектора; *3* — диэлектрические пробки; *4* — металлическая гильза.

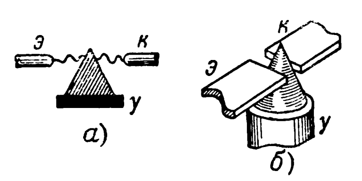
Указанный конструктивный вариант не является единственно возможным. На фиг. 7 изображен коаксиальный вариант кристаллического триода. В середину металлической гильзы вставлен вделанный в оправку германиевый диск диаметром окодо 3 и толщиной около 0,5 *мм*. По центру диска с обеих сторон сделаны круглые тарельчатые углубления, так что толщина германиевого диска в самом тонком своем месте (в центре) составляет приблизительно 0,05—0,06 *мм*. Контактные пружинки подводятся к германиевому диску с двух сторон вдоль оси гильзы. Они крепятся на проволочных стерженьках, укрепленных в диэлектрических пробках.

Характеристики такого триода ничем не отличаются от характеристик патронного триода. В качестве преимуществ такой конструкции триода следует отметить улучшенную устойчивость контактов, электростатическую экранировку между входной и выходной цепями и устранение затруднительной установки концов контактных пружин на определенном, очень малом расстоянии. К недостаткам конструкции такого типа следует отнести необходимость точной центровки обоих контактов.

В коаксиальном триоде, так же как и в патронном, одна из пружин является коллектором, другая — эмиттером, а гильза, соединенная через оправку с кристаллом германия по большой поверхности, служит выводом управляющего электрода. Включение коаксиального триода в схему также

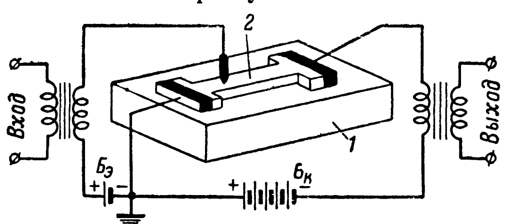
ничем не отличается от включения триода в патронном исполнении.

Кристаллический триод может быть выполнен при помощи плоского германиевого клина и двух контактных пружинок, подведенных с двух сторон к острию клина, как это изображено на фиг. 8. Там же показана схематически конструкция кристаллического триода с использованием германиевого конуса. Вместо контактных пружинок в данном случае роль коллектора и эмиттера выполняют две тонкие металлические пластинки. Основание клина или конуса на значительной площади припаивается к металлическому цоколю, служащему выводом управляющего электрода (основания).



Фиг. 8. Конструктивные варианты точечных триодов.
а — клиновая конструкция; *б* — коническая конструкция.

Перечисленные варианты не исчерпывают, разумеется, всех возможных конструкций кристаллического триода. Однако именно эти четыре указанных типа конструкций



Фиг. 9. Стержневой триод.
1 — диэлектрическое основание; *2* — германиевый кристалл.

триода с точечными контактами являются наиболее распространенными.

Говоря о кристаллических триодах с точечными контактами, нельзя не упомянуть о кристаллическом триоде стержневого типа, который не имеет большого практического применения как схемный элемент, но значение которого в экспериментальных работах по изучению физики процессов в полупроводниках исключительно велико.

На фиг. 9 изображен стержневой вариант кристаллического триода с точечным контактом, включенный в усилительную схему. В данном типе триода только эмиттер имеет точечный контакт. Как коллектор, так и управляющий элек-

трод имеют контакт с германием по большой поверхности. Основная задача при конструировании кристаллического триода такого типа состоит в том, чтобы осуществить минимальное сечение германиевого стержня. Практически это выполняется следующим образом. Тонкая германиевая пластинка приклеивается к диэлектрическому основанию. Затем к концам германиевой пластинки припаиваются выводы коллектора и управляющего электрода, на германиевую пластинку накладывается шаблон и все выступающие из-под шаблона части германиевой пластинки удаляются при помощи песчаного дутья. После дутья поверхность германия протравливается. Таким образом, оказывается возможным изготовить стержни квадратного сечения со стороной квадрата в 0,1 *мм*. Концы стержня обычно оставляют широкими, чтобы облегчить крепление отводов.

Эмиттерный контакт посредством микрометрического винта может быть установлен в любой точке вдоль стержня. При помощи такого устройства оказывается возможным изучать скорость передвижения дырок и электронов в полупроводнике, проводимость в различных сечениях и при различных условиях, переходные процессы и многие другие явления.

Кристаллический триод такого типа может работать и в обычных технических схемах, в которых возможно применение кристаллических триодов, причем по некоторым техническим данным, например по шумам, он оказывается даже лучше рассмотренных выше типов триодов с точечными контактами. Однако по другим показателям, например по граничной частоте усиления, данный тип кристаллического триода оказывается много хуже других типов. Это связано со значительным временем пробега носителей заряда от эмиттера до коллектора вдоль стержня и значительной рекомбинацией носителей заряда, эмиттированных в полупроводник, со свойственными данному полупроводнику свободными зарядами.

Кроме триодов с точечными контактами, возможно осуществить и бесконтактные кристаллические триоды, которые в силу их конструктивных особенностей называют плоскостными или слоистыми кристаллическими триодами.

3. СЛОИСТЫЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ТРИОД

Принцип действия и конструкция слоистых кристаллических триодов основываются на выпрямляющем действии переходов типа p-n. Именно поэтому слоистые кристалличе-

ские триоды называют также триодами типа p-n. Переход типа p-n образуется в цельном кристалле германия, в котором в одном объеме сконцентрировано преобладающее количество донаторных примесей, а в другом — преобладающее количество акцепторных примесей. Между этими объемами находится переходный слой, обладающий приблизительно равным количеством как донаторных, так и акцепторных примесей. Таким образом, в одном и том же кристалле германия имеется, с одной стороны, объем с дырочной проводимостью, с другой стороны, объем с электронной проводимостью и посредине между ними некоторая переходная область. Такой кристалл при включении в схему ведет себя, как обычный кристаллический диод, т. е. один из крайних объемов играет роль кристалла, а другой — роль контактной пружинки[1]. Способы получения таких кристаллов будут описаны ниже (см. § 18).

Допустим, что в некотором образце объем типа p ведет себя по отношению к объему типа n, как пружинка по отношению к кристаллу. Тогда возникает вопрос: нельзя ли, заключив объем типа n между двумя объемами типа p, получить кристаллический триод.

Мы уже встречались с кристаллическим триодом, у которого пружинки подходили с двух сторон к тонкому германиевому диску. Очевидно, что такой тип слоистого триода будет аналогичен коаксиальному триоду, причем объем с проводимостью типа n оказывается аналогичным германиевому кристаллу в коаксиальном триоде и поэтому должен представлять собой очень тонкий (порядка сотых долей миллиметра) слой, разделяющий два объема типа p, которые заменяют контактные пружинки коллектора и эмиттера. Какой из объемов будет выполнять роль коллектора, а какой роль эмиттера, — определяется соотношением их удельных проводимостей и их геометрией.

В этом случае между объемами, обладающими различным типом проводимости, также обязательно наличие переходных областей. Кроме того, следует учесть, что все три объема различной проводимости вместе с их переходными областями должны быть получены в одном целом монолитном кристалле с однородной кристаллической решеткой.

---

[1] Строго говоря, в рассмотренном выше точечном кристаллическом триоде под контактной пружинкой в кристалле возникает область с переходом типа p-n, наличием которой и объясняется детектирующее действие контакта. Таким образом, по принципу действия между точечными и слоистыми кристаллическими триодами нет особого различия.

Переход типа p-n невозможно получить спаиванием или сваркой двух кристаллов с различным типом проводимости.

Рассматриваемый вариант кристаллического слоистого триода, в котором тонкий объем германия типа n заключен между двумя объемами германия типа p с различной величиной удельной проводимости, не является единственно возможным. Можно изготовить и такой кристаллический триод, в котором тонкий слой германия типа p заключен между двумя слоями германия типа n с различной величиной удельной проводимости. В зависимости от порядка чередования типов проводимости в слоях такие триоды называются триодами типа p-n-p или триодами типа n-p-n. Следует сказать, что возможно также изготовление стержневых кристаллических триодов слоистого типа. В таком триоде от основного стерженька, обладающего одним типом проводимости, ответвляется боковой стерженек другого типа проводимости, исполняющий функции эмиттерной пружинки контактного стержневого триода. Очевидно, что в этом случае уже нельзя перемещать эмиттерный контакт вдоль стержня с целью эксперимента, так как и основной стержень и боковое ответвление должны быть изготовлены из одного кристалла германия.

Наконец, следует упомянуть также о многослойных слоистых триодах. В результате экспериментов было выявлено, что добавление к триоду типа p-n еще одного слоя соответственно типа n или p улучшает некоторые его данные, в частности увеличивает усиление по току. Слоистый триод становится аналогичным точечному триоду. Если продолжать увеличивать число слоев, то усиление по току будет расти, однако такое увеличение числа слоев ограничивается увеличивающимися паразитными емкостями, большим временем пробега и большой рекомбинацией.

Более подробно с физикой процессов в кристаллических триодах можно ознакомиться в ряде вышедших за последнее время статей и книг.

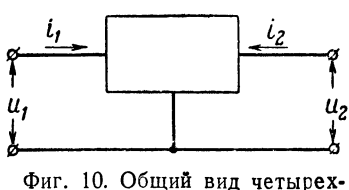
ГЛАВА ВТОРАЯ

ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ СХЕМЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ТРИОДА

Подобно вакуумной электронной лампе кристаллический триод с его тремя выводами в линейном режиме можно рассматривать как некоторый активный линейный четырехполюсник, на вход которого подается входное напряжение и

с выхода которого снимается выходное напряжение. На входе протекает входной ток, на выходе — выходной.

На фиг. 10 изображен такой четырехполюсник и обозначены входные и выходные токи и напряжения. Очевидно, что за независимые переменные могут быть приняты как токи, так и напряжения. В зависимости от того, будут ли приняты в качестве независимых переменных токи или напряжения, определится и эквивалентная схема кристаллического триода: выбор токов в качестве независимых переменных приводит к эквивалентной схеме сопротивлений, а выбор напряжений — к эквивалентной схеме проводимостей. Как тот, так и другой метод изображения эквивалентной схемы кристаллического триода имеет свои преимущества и недостатки.



Фиг. 10. Общий вид четырехполюсника.

Достоинством эквивалентной схемы в сопротивлениях является то, что она хорошо отражает особенности характеристик кристаллических триодов, которые в настоящее время в силу ряда причин снимаются при токах в качестве независимых переменных (подробно о характеристиках кристаллических триодов говорится в гл. 3).

Недостаток схемы сопротивлений состоит в том, что она существенно отличается от эквивалентных схем, принятых для вакуумных электронных ламп. Поэтому использование такой схемы не позволяет применять теорию ламповых усилителей к усилителям с кристаллическими триодами и заставляет для них создавать теорию заново.

Эквивалентная схема проводимостей была разработана для вакуумных усилительных ламп В. И. Сифоровым и в настоящее время широко применяется в радиотехнике. На основании этой схемы подробно разработана теория ламповых усилителей.

Применение схемы проводимостей к кристаллическим триодам, предложенное А. А. Куликовским, удобно тем, что дает возможность использовать хорошо разработанную теорию ламповых усилителей к усилителям с кристаллическими триодами.

В данной главе мы рассмотрим как эквивалентную схему сопротивлений, так и эквивалентную схему проводимостей,

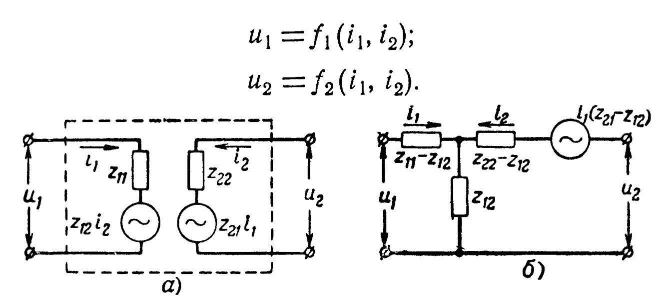
приведем формулы, выражающие соотношения между параметрами той и другой схем и проведем сравнение параметров эквивалентных схем кристаллического и вакуумного триодов.

4. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА СОПРОТИВЛЕНИЙ

Рассматривая четырехполюсник, изображенный на фиг. 10, можно сказать, что если за независимые переменные принять токи, то входное и выходное напряжения могут быть представлены в виде функций токов:

$$u_1 = f_1(i_1, i_2);$$

$$u_2 = f_2(i_1, i_2).$$



Фиг. 11. Эквивалентные схемы кристаллического триода в параметрах четырехполюсника.

Если малые изменения токов приводят к малым изменениям напряжений, то можно записать следующие основные уравнения:

$$\Delta u_1 = z_{11} \cdot \Delta i_1 + z_{12} \cdot \Delta i_2;$$

$$\Delta u_2 = z_{21} \cdot \Delta i_1 + z_{22} \cdot \Delta i_2.$$

Считая, что приращениями (сверх постоянных составляющих) являются мгновенные значения токов и напряжений, выразим их взаимную связь:

$$u_1 = z_{11} \cdot i_1 + z_{12} \cdot i_2; \qquad (1)$$

$$u_2 = z_{21} \cdot i_1 + z_{22} \cdot i_2. \qquad (2)$$

Эквивалентная схема, соответствующая уравнениям (1) и (2), изображена на фиг. 11,*а* и преобразована в Т-образную схему сопротивлений на фиг. 11,*б*. Из рассмотрения эквивалентных схем, изображенных на фиг. 11, можно сделать следующие выводы:

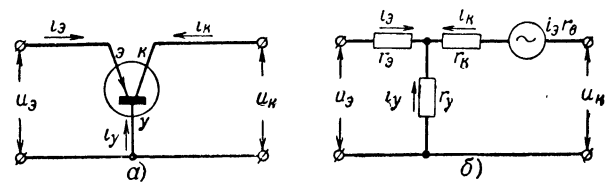
1. Сопротивление z_{11} является сопротивлением входа кристаллического триода в условиях холостого хода.

2. Сопротивление z_{22} является сопротивлением выхода кристаллического триода при условии обратного холостого хода, т. е. при разомкнутом входе.

3. Сопротивление z_{12} является сопротивлением обратной связи в кристаллическом триоде.

4. Сопротивление z_{21} определяет величину активного элемента четырехполюсника — генератора э. д. с. и поэтому до некоторой степени аналогично крутизне вакуумного триода. Его можно назвать сопротивлением усиления.

Ввиду того, что кристаллический триод имеет три вывода, включение его в четырехполюсник должно происходить следующим образом: один из электродов должен быть вход-



Фиг. 12. Кристаллический триод в схеме с общим управляющим электродом.

а — схема включения триода; *б* — соответствующая эквивалентная схема.

ным, второй — выходным и третий — общим электродом для цепей входа и выхода. Это аналогично включению вакуумного триода по схеме с общим катодом, с общей сеткой или с общим анодом. Очевидно, что параметры рассмотренного четырехполюсника будут зависеть от того, как включен кристаллический триод. Ввиду этого целесообразно перейти от рассмотренных параметров четырехполюсника к таким параметрам кристаллического триода, которые остаются неизменными для различных вариантов включения. Переход этот может быть осуществлен следующим образом.

Используя эквивалентную схему, изображенную на фиг. 11,*б*, будем считать, что данная эквивалентная схема соответствует случаю включения кристаллического триода по схеме с общим управляющим электродом (фиг. 12,*а*). Назовем сопротивление в левой горизонтальной ветви (фиг. 11,*б*) сопротивлением эмиттера, сопротивление в правой горизонтальной ветви — сопротивлением коллектора, а сопротивление в вертикальной ветви — сопротивлением управляющего электрода. Таким образом, получим схему фиг. 12,*б*. Условимся впредь все сопротивления и проводимости, относящиеся к самому кристаллическому триоду,

обозначать малыми буквами, а сопротивления и проводимости внешних цепей и результирующие проводимости и сопротивления — большими буквами. Кроме того, будем рассматривать работу кристаллического триода на достаточно низких частотах, при которых можно пренебречь действием паразитных реактивностей, поэтому все сопротивления будем считать чисто активными.

Сравнивая схемы фиг. 11,*б* и 12,*б* и учитывая указанные допущения, можно сказать, что для данного случая включения кристаллического триода параметры четырехполюсника и параметры кристаллического триода связаны между собой следующим образом:

Входное сопротивление холостого хода

$$r_{11} = r_э + r_у. \tag{3}$$

Выходное сопротивление обратного холостого хода

$$r_{22} = r_к + r_у. \tag{4}$$

Сопротивление обратной связи

$$r_{12} = r_у. \tag{5}$$

Сопротивление усиления

$$r_{21} = r_в + r_у. \tag{6}$$

Сопротивление эмиттера

$$r_э = r_{11} - r_{12}. \tag{7}$$

Сопротивление коллектора

$$r_к = r_{22} - r_{12}, \tag{8}$$

Сопротивление управляющего электрода

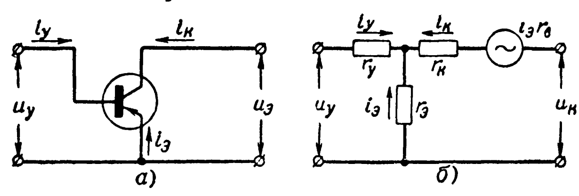
$$r_у = r_{12}. \tag{9}$$

Взаимное сопротивление

$$r_в = r_{21} - r_{12}. \tag{10}$$

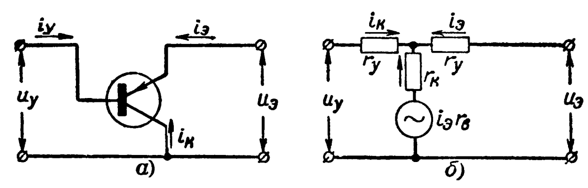
Если произвести включение кристаллического триода по другой схеме, например с общим коллектором или с общим эмиттером, то приведенные выражения (3) — (10) примут совершенно другой вид и сопротивления r_{11}, r_{12} и т. д. для каждого случая включения будут иметь свои величины.

В некоторых литературных источниках кристаллические триоды характеризуются не сопротивлениями эмиттера, коллектора и т. д., а сопротивлениями r_{11}, r_{12} и т. д. В этом случае под сопротивлениями r_{11} и др. понимают их величину при включении кристаллического триода по схеме с общим управляющим электродом.



Фиг. 13. Кристаллический триод в схеме с общим эмиттером.

а — схема включения триода; *б* — соответствующая эквивалентная схема.



Фиг. 14. Кристаллический триод в схеме с общим коллектором.

а — схема включения триода; *б* — соответствующая эквивалентная схема.

Для двух других случаев включения кристаллического триода, изображенных на фиг. 13 и 14, связь между параметрами четырехполюсника и параметрами кристаллического триода может быть выражена следующим образом.

Для схемы с общим эмиттером:

$$r_{11} = r_у + r_э; \quad (11)$$

$$r_{12} = r_э; \quad (12)$$

$$r_{21} = r_э - r_в; \quad (13)$$

$$r_{22} = r_э + r_к - r_в; \quad (14)$$

$$r_э = r_{12}; \quad (15)$$

$$r_у = r_{11} - r_{12}; \quad (16)$$

$$r_в = r_{12} - r_{21}; \quad (17)$$

$$r_к = r_{22} - r_{21}. \quad (18)$$

Для схемы с общим коллектором:

$$r_{11} = r_у + r_к; \tag{19}$$

$$r_{12} = r_к - r_в; \tag{20}$$

$$r_{21} = r_к; \tag{21}$$

$$r_{22} = r_э + r_к - r_в; \tag{22}$$

$$r_к = r_{21}; \tag{23}$$

$$r_у = r_{11} - r_{21}; \tag{24}$$

$$r_в = r_{21} - r_{12}; \tag{25}$$

$$r_э = r_{22} - r_{12}. \tag{26}$$

Прежде чем перейти к рассмотрению внешних цепей, необходимо остановиться на устойчивости короткозамкнутого триода по постоянному току.

В некоторых случаях внутренняя положительная обратная связь кристаллического триода оказывается настолько сильной, что схема с кристаллическим триодом оказывается неустойчивой. Такое свойство кристаллического триода является полезным при использовании его в спусковых схемах, но создает большие трудности при использовании кристаллического триода в усилительных схемах. Теория и практика показывают, что при прочих равных условиях кристаллический триод оказывается наиболее склонным к самовозбуждению, когда внутреннее сопротивление источника входного сигнала и сопротивление нагрузки триода равны нулю. Триод, поставленный в такие условия, мы будем называть двусторонне короткозамкнутым. Устойчивость двусторонне короткозамкнутого кристаллического триода может быть определена следующими неравенствами:

$$\begin{aligned} \Delta &= r_{11} \cdot r_{22} - r_{12} \cdot r_{21} > 0 \quad \text{при} \quad r_{11} \cdot r_{22} > 0; \\ \Delta &= r_{11} \cdot r_{22} - r_{12} \cdot r_{21} < 0 \quad \text{при} \quad r_{11} \cdot r_{22} < 0. \end{aligned} \tag{27}$$

Если величина Δ, которую мы будем называть детерминантом цепи, оказывается равной нулю или меньшей нуля при $r_{11} \cdot r_{22} > 0$, или же равной нулю или больше нуля при $r_{11} \cdot r_{22} < 0$, то двусторонне короткозамкнутый триод оказывается неустойчивым. Усилительная схема с таким триодом может устойчиво работать только при правильном выборе сопротивлений во внешних цепях. Если триод в двусторонне короткозамкнутом состоянии оказывается

устойчивым, то он будет устойчиво работать при любых величинах нагрузочного сопротивления и внутреннего сопротивления источника входного сигнала. Преобразуя неравенство (27), можно получить условие устойчивости в другой форме:

$$\delta = \frac{r_{12} \cdot r_{21}}{r_{11} \cdot r_{22}} < 1. \tag{28}$$

Величина δ, которую будем в дальнейшем называть коэффициентом устойчивости короткозамкнутого триода, всегда положительна и оценка устойчивости триода с ее помощью не связана с необходимостью определения знака произведений $r_{11} \cdot r_{22}$ и $r_{12} \cdot r_{21}$.

5. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ПРОВОДИМОСТЕЙ

Принимая токи за независимые переменные, мы получили эквивалентную схему кристаллического триода, состоящую из сопротивлений и описываемую уравнениями (1) и (2). Если разрешить те же уравнения относительно токов, то получатся уравнения (29) и (30), в которых независимыми переменными являются напряжения:

$$i_1 = \frac{u_1 \cdot r_{12} - u_1 \cdot r_{22}}{r_{21} \cdot r_{12} - r_{11} \cdot r_{22}}; \tag{29}$$

$$i_2 = \frac{u_2 \cdot r_{11} - u_1 \cdot r_{21}}{r_{11} \cdot r_{22} - r_{21} \cdot r_{12}}. \tag{30}$$

Заметим, что в знаменателе обоих выражений стоит уже встречавшаяся нам ранее величина Δ. Приводя выражения (29) и (30) к общему виду, получим:

$$i_1 = y_{11} \cdot u_1 + y_{12} \cdot u_2; \tag{31}$$

$$i_2 = y_{21} \cdot u_1 + y_{22} \cdot u_2. \tag{32}$$

Здесь проводимость короткого замыкания

$$y_{11} = \frac{r_{22}}{\Delta}. \tag{33}$$

Проходная проводимость

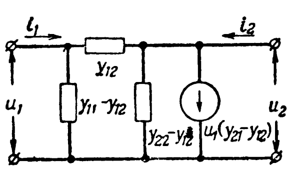
$$y_{12} = \frac{-r_{12}}{\Delta}. \tag{34}$$

Выходная проводимость обратного короткого замыкания

$$y_{22} = \frac{r_{11}}{\Delta}; \tag{35}$$

$$y_{21} = \frac{-r_{21}}{\Delta}. \tag{36}$$

Эквивалентная схема, описываемая уравнениями (31) и (32), представляет собой П-образную схему проводимостей с генератором тока в качестве активного элемента, изображенную на фиг. 15.



Фиг. 15. Эквивалентная схема проводимостей в параметрах четырехполюсника

Сравнивая эту схему с эквивалентной схемой вакуумного триода, можно сказать, что крутизне S соответствует разность $(y_{21} - y_{12})$.

Выражая крутизну через параметры кристаллического триода в сопротивлениях, получим:

$$S = y_{21} - y_{12} = \frac{-(r_{21} - r_{12})}{\Delta} = -\frac{r_в}{\Delta}. \tag{37}$$

Сопротивление $r_в$ аналогично крутизне для эквивалентной схемы сопротивлений; Δ — детерминант, который определяет устойчивость короткозамкнутого кристаллического триода и является одновременно модулем пересчета параметров эквивалентной схемы сопротивлений к параметрам эквивалентной схемы проводимостей.

Сопротивление $r_в$ является, вообще говоря, комплексной величиной, которая зависит от частоты и только на достаточно низких частотах может считаться чисто активной. Соответственно и крутизна кристаллического триода является величиной, зависящей от частоты. Частотные свойства точечного кристаллического триода в основном определяются именно изменением с частотой сопротивления $z_в$, которое приводит к изменению (модуля и фазы) коэффициента усиления по току α:

$$\alpha = \frac{z_в}{r_к}.$$

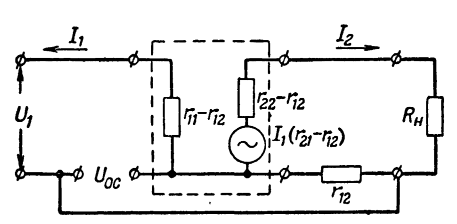
Сопротивление $r_к$ практически не зависит от частоты. В одном из экспериментов на частоте 1 000 *гц* величина α

имела модуль 2,5 и нулевую фазу; при измерении на частоте 1 *мггц* модуль был равен $\alpha = 1,5$ и фаза $\varphi_\alpha = -60^\circ$, а на частоте 5 *мггц* — модуль $\alpha = 0,2$ и фаза $\varphi_\alpha = -100^\circ$.

Величина, обратная проводимости y_{22}, может быть названа внутренним сопротивлением кристаллического триода по аналогии с вакуумным триодом. Надо обратить внимание, что при оценке выходного сопротивления эквивалентной схемы усилителя на кристаллическом триоде следует учитывать также и сопротивление источника сигнала, подключенного к входу кристаллического триода, а при оценке входного сопротивления — сопротивление нагрузки. В вакуумном триоде вследствие относительно слабой величины обратной связи эти величины приближенно можно не учитывать.

6. КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ТРИОД КАК УСИЛИТЕЛЬ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Чтобы лучше уяснить действие внутренней обратной связи, удобно обычную Т-образную схему кристаллического триода (см. фиг. 11) представить так, как это изображено на фиг. 16. В этом случае эквивалентная схема кристаллического триода расчленяется на два самостоятельных элемента: собственно усилительный элемент (обведен на фиг. 16 пунктирной линией) и элемент обратной связи — сопротивление r_{12}. Напряжение обратной связи, возникающее на сопротивлении r_{12} при протекании по нему тока I_2, подается на вход схемы. Таким образом, в кристаллическом триоде существует обратная связь по току, подаваемая на вход схемы последовательно.



Фиг. 16. Кристаллический триод как усилитель с обратной связью.

На вход собственно усилительного элемента подается сумма напряжений входного сигнала и обратной связи. Эквивалентная схема собственно усилительного элемента ничем не отличается от эквивалентной схемы вакуумного триода на низких частотах. Такое представление эквивалентной схемы кристаллического триода дает возможность применить методику расчета усилителей с положительной

обратной связью к расчету усилительных схем на кристаллических триодах, а также оценить влияние положительной обратной связи и свойства собственно усилительного элемента.

Например, если определять коэффициент усиления по напряжению так, как это принято делать для вакуумных триодов, т. е. как отношение напряжения на выходе к напряжению на входе, то получим, что коэффициент усиления по напряжению с учетом обратной связи $K_{o.c}$ и без обратной связи K связаны между собой следующей зависимостью:

$$K_{o.c} = \frac{K}{1 \pm K \cdot \beta}, \qquad (38)$$

где β — коэффициент обратной связи.

Знак минус в знаменателе соответствует положительной обратной связи, а знак плюс — отрицательной.

Выраженные через параметры четырехполюсника значения K и $K_{o.c}$ для точечного триода равны:

$$K_{o.c} = \frac{r_{21} \cdot R_н}{r_{11}(r_{22} + R_н) - r_{12} \cdot r_{21}}; \qquad (39)$$

$$K_1' = \frac{r_{21} \cdot R_н}{r_{11}(r_{22} + R_н)}. \qquad (40)$$

Формула (40) дает возможность рассчитывать коэффициент усиления по напряжению для случая, когда положительная обратная связь скомпенсирована подачей равной ей по величине отрицательной обратной связи. Необходимость такой компенсации может быть вызвана стремлением повысить устойчивость работы кристаллического триода или уменьшить коэффициент нелинейных искажений.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТРИОДОВ

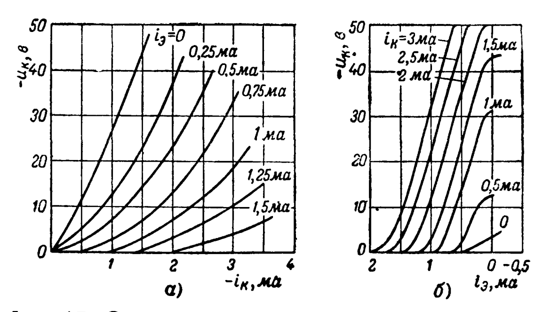
Кристаллические триоды как по своей конструкции, так и с точки зрения их технических данных и характеристик могут быть разбиты на две большие группы: точечные и слоистые кристаллические триоды. Точечные кристаллические триоды в свою очередь можно разделить на триоды с использованием германия типа n и триоды с использова-

нием германия типа р. Аналогичное разделение можно произвести и среди слоистых кристаллических триодов, так как в слоистых триодах крайние слои германия выполняют соответственно функции эмиттера и коллектора, а средний слой, к которому припаивается вывод управляющего электрода, играет роль, аналогичную роли полупроводникового кристалла в точечных триодах.

Отдельного рассмотрения заслуживают так называемые кристаллические тетроды, т. е. кристаллические устройства с четырьмя выводами. Кристаллические тетроды могут выполняться также с точечными контактами и бесконтактные (слоистые).

7. ТОЧЕЧНЫЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ТРИОДЫ

Точечные кристаллические триоды могут иметь самое различное конструктивное выполнение, основная же идея всех конструкций заключается в том, что к полупроводниковому кристаллу подводятся три контакта, один из которых



Фиг. 17. Статические характеристики точечного триода.

а — выходные характеристики; *б* — характеристики усиления.

соединяется с кристаллом по сравнительно большой площади, а два других являются точечными контактами (совершенно идентичными контактам кристаллических детекторов) и расположены на близком расстоянии друг от друга.

На фиг. 17 приведены два семейства характеристик точечного кристаллического триода, одно из которых может быть названо семейством характеристик усиления, а второе — семейством выходных характеристик. По своему внешнему виду первое семейство характеристик похоже на семейство сеточных характеристик вакуумного триода,

а второе — на семейство анодных характеристик. Однако при более детальном рассмотрении можно заметить, что характеристики эти совершенно отличны от характеристик вакуумного триода, так как место напряжений заняли токи, а место токов — напряжения. Часто говорят, что характеристики кристаллического триода являются «двойственными» по отношению к характеристикам вакуумного триода. Такая двойственность характеристик положена в основу одного из методов расчета схем с кристаллическими триодами. В этом методе реальные характеристики кристаллического триода принимаются за характеристики некоторого условного вакуумного триода и расчет производится для этого условного триода с последующим пересчетом полученных величин для схемы с кристаллическим триодом.

В результате того, что характеристики кристаллических триодов снимаются в функции токов, а не в функции напряжений (как это имеет место у вакуумных триодов), величины, характеризующие кристаллический триод, имеют размерность сопротивлений. Причиной, вынуждающей снимать характеристики кристаллических триодов в функции токов, явилась неоднозначность при выражении токов в функции от напряжения; которая является следствием сильной внутренней положительной обратной связи.

Кроме приведенных на фиг. 17 семейств характеристик, для кристаллического триода могут быть сняты еще два семейства характеристик: напряжение на эмиттере в функции от тока эмиттера при постоянном токе коллектора и напряжение на эмиттере в функции от тока коллектора при неизменном токе эмиттера. Первое семейство может быть названо семейством входных характеристик, а второе семейство — семейством характеристик обратной связи. Все четыре семейства характеристик полностью характеризуют данный кристаллический триод. По каждой из характеристик может быть найдено одно из четырех сопротивлений, характеризующих кристаллический триод в данной рабочей точке или его среднее значение для рабочей области.

Вообще говоря, для получения всех четырех сопротивлений достаточно двух семейств характеристик. Наиболее удобными парами семейств характеристик следует считать либо характеристики усиления и выходные характеристики, либо входные и выходные характеристики. Так как снятие характеристик обычно производится для кристаллического триода, включенного по схеме с общим управляющим электродом, то и величины сопротивлений, полученные из

характеристик, будут соответствовать данной схеме включения:

$$r_{11} = \left| \frac{\Delta u_э}{\Delta i_э} \right|_{i_к = \text{const}}; \quad (41)$$

$$r_{21} = \left| \frac{\Delta u_к}{\Delta i_э} \right|_{i_к = \text{const}}; \quad (42)$$

$$r_{12} = \left| \frac{\Delta u_э}{\Delta i_к} \right|_{i_э = \text{const}}; \quad (43)$$

$$r_{22} = \left| \frac{\Delta u_к}{\Delta i_к} \right|_{i_э = \text{const}}. \quad (44)$$

Однако не всегда кристаллические триоды характеризуют сопротивлениями r_{11}, r_{21} и т. д. В некоторых источниках в качестве параметров кристаллического триода используют сопротивления эмиттера, коллектора, управляющего электрода и взаимное сопротивление. Связь между теми и другими параметрами для схемы с общим управляющим электродом дана в выражениях (3) — (10).

Кроме перечисленных сопротивлений, кристаллические триоды характеризуются статическим коэффициентом усиления по току

$$\alpha = -\left| \frac{\Delta i_к}{\Delta i_э} \right|_{u_к = \text{const}} = \frac{r_{21}}{r_{22}}, \quad (45)$$

коэффициентом усиления по мощности (определяемым как отношение мощности сигнала в нагрузке кристаллического триода к номинальной мощности генератора сигнала на входе кристаллического триода), коэффициентом шума, максимальной мощностью рассеивания на коллекторе, максимальными токами и напряжениями, к. п. д. в том или ином режиме, граничной частотой усиления (частотой, при которой усиление по току α падает на 3 *дб*). Триоды, предназначенные для импульсной работы, часто характеризуются предельной частотой следования импульсов, минимальной длительностью импульса, максимальной крутизной фронта (минимальным временем нарастания фронта импульса) и формой импульсов.

Основным свойством точечного кристаллического триода, отличающим его в значительной степени от вакуумного,

является его малое входное и сравнительно высокое выходное сопротивления. Это обусловлено тем, что эмиттерный контакт включается в прямом направлении (в направлении пропускания), тогда как коллекторный контакт включается в обратном направлении (в направлении запирания). Под входным и выходным сопротивлениями триода следует понимать соответственно сопротивление на входе между контактами эмиттера и управляющего электрода при разомкнутом выходе (т. е. r_{11}) и сопротивление на выходе между контактами коллектора и управляющего электрода при разомкнутом входе (т. е. r_{22}).

Входное сопротивление точечных кристаллических триодов имеет порядок 200—400 *ом* и лишь в отдельных случаях достигает величин порядка 900 — 1 000 *ом*. Выходное сопротивление может колебаться в довольно широких пределах (от 5 до 30 *ком*).

Максимальное усиление по мощности, которое могут обеспечить точечные триоды, составляет 20—30 *дб* на каскад. Следует, однако, учесть, что требование максимального усиления и требование устойчивости в большинстве случаев оказываются противоречивыми, поэтому часто приходится выбирать усиление значительно ниже максимального с целью обеспечения устойчивости работы.

Статический коэффициент усиления по току точечных триодов, как правило, превышает единицу и составляет приблизительно 2—2,5; однако имеется возможность получить значительно более высокие значения усиления по току.

Мощность, рассеиваемая на коллекторе, не превышает обычно 100—200 *мвт* и может быть повышена приблизительно вдвое путем применения теплоотводящих пластин (радиаторов), припаиваемых к массивному цоколю, который служит выводом управляющего электрода.

Максимальные значения токов эмиттера и коллектора не превышают обычно 40 *ма* в режиме непрерывной работы и 100—150 *ма* в режиме импульсной работы.

Напряжение источника питания коллектора может меняться в довольно широких пределах (в зависимости от схемы и условий работы) и равно обычно 20—100 *в*. Однако кристаллические триоды могут нормально работать и при очень малых напряжениях питающих источников (даже порядка долей вольта).

Одним из существенных недостатков точечного триода является высокий коэффициент шума, составляющий обычно 45—55 *дб* и в отдельных случаях достигающий 70 *дб*.

В качестве иллюстрации в табл. 1 приводятся параметры пяти точечных кристаллических триодов с германием типа n.

Таблица 1

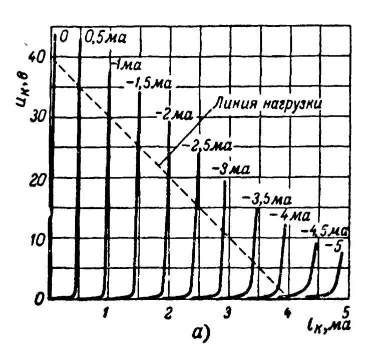
	r_{11}, *ом*	r_{21}, *ком*	r_{22}, *ком*	r_{12}, *ом*	$\alpha_{макс}$	$k_{макс}$, *д*
1	200	26	8,9	31	3	21,2
2	335	29,5	7,3	50	4	21,5
3	350	49	9,5	55	5	26
4	390	26	7,6	80	3,5	20,2
5	280	48	10,9	51	4,5	26

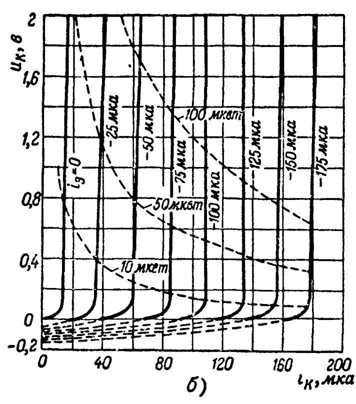
Как видно из табл. 1, параметры кристаллических триодов не отличаются однородностью. В настоящее время при изготовлении однотипных кристаллических триодов приходится считаться с тем, что минимально достижимый разброс параметров составляет до 30% для сопротивлений и граничной частоты, до 20% для статического коэффициента усиления по току и до 3 *дб* для коэффициента шумов. Это является значительным недостатком, который мешает серийному выпуску кристаллических триодов с одинаковыми параметрами и широкому применению взаимозаменяемых кристаллических триодов в радиотехнических схемах. Причинами разброса параметров могут быть самые разнообразные явления, как то: различная обработка поверхности кристалла, различие в расстоянии между контактными точками и в силе давления пружинки у отдельных образцов, различие в формовке, наконец, неоднородность самого кристалла и многие другие.

Граничные частоты усиления точечных кристаллических триодов лежат в пределах 10—30 *мггц*. Так же как и в вакуумном триоде, граничные частоты усиления в кристаллическом триоде существенно определяются временем пробега зарядов между эмиттером и коллектором.

Германий типа p долгое время считался малопригодным для его использования в кристаллических триодах. Однако результаты некоторых исследований свойств германия типа p показывают, что в кристаллических триодах он в ряде случаев дает лучшие показатели, чем германий типа n. Так, например, триоды с германием типа p дают возможность повысить мощность рассеивания на коллекторе и несколько повысить граничную частоту за счет того, что по-

движность электронов, эмиттируемых в германий типа p, в два раза больше подвижности дырок, эмиттируемых в германий типа n. Кроме того, точечные кристаллические триоды с германием типа p очень перспективны для использования их в качестве усилителей мощности. Чередуя каскады с германием типа n и каскады с германием типа p, можно получить высокие усилительные свойства тракта в целом. Следует отметить, что триоды с германием типа p имеют несколько меньший коэффициент шумов.





Фиг. 18. Выходные статические характеристики слоистого триода типа n-p-n.

а — для больших значений токов и напряжений; *б* — для малых значений токов и напряжений.

8. СЛОИСТЫЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ТРИОДЫ

Характеристики слоистых кристаллических триодов мало отличаются от характеристик точечных триодов (фиг. 18) и снимаются в тех же координатах.

Слоистые кристаллические триоды могут быть охарактеризованы теми же параметрами, что и точечные триоды.

По принципу действия и по характеристкам слоистые триоды значительно ближе к вакуумным лампам, чем триоды точечные. Для них можно было бы снимать характеристики тем же методом, который принят для вакуумных ламп. Такие характеристики имели бы вид очень хороших пентодных характеристик.

Тот или иной метод снятия характеристик может быть рекомендован в зависимости от того, какой из рассматриваемых выше эквивалентной схемой и какими формулами желательно пользоваться.

С точки зрения конструктивного выполнения и механической устойчивости преимущество слоистых триодов состоит

в отсутствии точечных контактов, что повышает срок службы триода и делает его менее критичным к перегрузкам.

Статический коэффициент усиления по току слоистых триодов близок к единице, но всегда остается меньше ее. Обратная связь в слоистых триодах очень слаба; в силу этого слоистые триоды оказываются устойчивыми при любых значениях сопротивлений внешних цепей. Входное сопротивление слоистых триодов составляет 200 ÷ 300 *ом*, а выходное сопротивление значительно выше, чем у точечных триодов, и изменяется в пределах от единиц до десятков мегом.

Табл. 2 позволяет сравнить типовые параметры точечных и слоистых кристаллических триодов. Следует иметь в виду, что слоистые триоды появились позже триодов точечных, и что от них можно ожидать значительно больше, чем достигнуто в настоящее время.

Таблица 2

Сравнительная таблица типовых параметров кристаллических триодов

Параметр	Точечные триоды	Слоистые триоды
Срок службы, час	70 000	90 000
Усиление по мощности, *дб*	20—30	30—50
Граничная частота, *мггц*	5—30	3—5
Коэффициент шума, *дб*	45—54	10—15
Коэффициент полезного действия в классе А, %	30—35	45—49
Коэффициент полезного действия класса В, %	70	75
Статическое усиление по току	2,0—4,0	0,9—0,98
Мощность, рассеиваемая на коллекторе	20—200 *мвт*	До 20 *вт*
Ток эмиттера	1—40 *ма*	До 5—10 *а*
Ток коллектора	2—40 *ма*	До 5—10 *а*
Напряжение на коллекторе, *в*	20—100	50—200
Входное сопротивление, *ом*	200—1 000	250
Выходное сопротивление, *мгом*	0,015—0,030	5—15

Из табл. 2 видно, что слоистые триоды обладают значительно более слабыми шумами, чем триоды точечные. Этим своим свойством они также обязаны отсутствию в них точечных контактов.

Слоистые триоды предназначаются в основном для работы в схемах усилителей и автогенераторов. Применение слоистых кристаллических триодов в импульсных спусковых

схемах затрудняется тем, что они имеют статический коэффициент усиления по току меньше единицы. В спусковых схемах используются точечные кристаллические триоды с усилением по току больше единицы. Это позволяет сделать заключение, что хотя слоистые кристаллические триоды по ряду данных значительно превосходят точечные триоды, оба типа кристаллических триодов будут развиваться параллельно с целью использования их в схемах различного назначения.

Кристаллические триоды обоих типов имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с электронной лампой, к числу которых можно отнести отсутствие вакуума, малую потребляемую мощность, малые габариты и вес, большой срок службы, высокую механическую прочность и отсутствие микронного эффекта.

Табл. 3 дает возможность сравнить основные параметры кристаллических триодов обоих типов с электровакуумным триодом среднего качества.

Таблица 3

Сравнительная таблица параметров кристаллических триодов и электровакуумного триода

Параметр	Точечный триод	Слоистый триод	Электровакуумные триоды
Коэффициент полезного действия в режиме класса А, %	30—35	45—49	1—25
Коэффициент полезного действия в режиме класса В, %	70	75	60
Усиление по мощности, *дб*	18—30	30—50	20—50
Предельный срок службы (по изменению усиления на 3 *дб*), час.	70 000	90 000	5 000
Минимальная мощность, потребляемая для нормальной работы, *вт*	10^{-3}	10^{-6}	0,1
Предельная температура, °С	70	70	500
Граничная частота, *мггц*	30—50	3—5	Свыше 100
Коэффициент шума, *дб*	45	15	5—15

Существенным преимуществом кристаллических триодов является их значительный срок службы. Указанные в табл. 3 сроки службы в 70 000 и 90 000 час. рассчитаны чисто теоретически на основании ряда многочасовых испытаний, так как 90 000 час. соответствует непрерывной круглосуточной работе в течение 12 лет. Столь значительный срок службы

кристаллических триодов, во много раз превышающий срок службы вакуумных ламп, делает очень перспективным применение кристаллических триодов в аппаратуре с большим количеством ламп (например, сложные счетно-решающие устройства), где имеют место частые отказы всего устройства вследствие выхода из строя хотя бы одной из ламп. С этой же точки зрения выгодно применять кристаллические триоды в усилительных установках, в которых смена ламп сопряжена со значительными трудностями, как, например, в усилителях, смонтированных на подземном или подводном кабеле.

По весу, габаритам и механической прочности кристаллические триоды также оказываются значительно лучше вакуумных триодов. Обычно точечные триоды собираются в металлических гильзах диаметром около 5 и длиной от 9 до 15 *мм*, внутренняя полость которых после сборки триода заполняется каким-либо вязким диэлектриком, обеспечивающим кристаллическому триоду высокую устойчивость при ударах и вибрациях, а также устраняющим влияние изменения свойств окружающей среды (влажности, давления) на работу кристаллического триода. В случае необходимости могут быть изготовлены триоды, целиком запрессованные в пластмассу и имеющие вид шарика диаметром 3—4 *мм*. Слоистые триоды отличаются еще более высокой механической прочностью и малыми размерами.

Исключительно важным преимуществом кристаллических триодов является малая мощность, потребляемая ими. С одной стороны, это объясняется отсутствием у них накала и, следовательно, отсутствием затрат мощности на накал, а с другой стороны, — свойством кристаллических триодов работать при малых напряжениях источника питания в случаях, когда с выхода каскада необходимо снять малую мощность. Так, например, при работе кристаллического триода в импульсной схеме, с выхода которой снимаются импульсы с амплитудой напряжения 6 *в*, напряжение источника питания коллектора может быть немногим более 10 *в*. Оказывается возможным собрать генератор звуковых частот со слоистым триодом, устойчиво генерирующий синусоидальные колебания при напряжении на коллекторе порядка 0,1—0,2 *в* и потребляющий при этом мощность 0,9—1,5 *мквт*. Очевидно, что выигрыш в потребляемой мощности будет особенно высок (по сравнению с вакуумным триодом) при получении малых мощностей (порядка сотых и тысячных долей ватта). Для сравнения можно указать, что такие эко-

номичные лампы, как 1А1П, 1Б1П и т. д., только на накал потребляют 0,072 *вт*.

Предельная температура, при которой кристаллические триоды работают нормально, значительно ниже предельной температуры вакуумных триодов. Однако, если учесть, что кристаллические триоды нагреваются при работе в значительно меньшей степени, чем вакуумные лампы, которые зачастую сами создают для себя повышенные температуры, то это обстоятельство в большинстве случаев не может считаться значительным недостатком. Гораздо более серьезным недостатком кристаллических триодов является довольно значительное изменение их параметров с изменением температуры.

Устойчивость точечных кристаллических триодов значительно хуже, чем устойчивость вакуумных триодов. С повышением рабочей частоты это различие несколько выравнивается как за счет ухудшения устойчивости вакуумного триода, так и за счет повышения устойчивости кристаллического триода. Последнее явление может быть объяснено падением усиления по току (а соответственно и крутизны) с ростом рабочей частоты.

Самыми серьезными недостатками кристаллических триодов в настоящий момент являются ограниченные рабочие частоты, малая выходная мощность и высокий коэффициент шумов. По этим показателям кристаллические триоды в настоящее время значительно уступают вакуумным триодам. Однако, если учесть, что кристаллические триоды появились сравнительно недавно и за короткий срок своего существования в значительной степени улучшили свои технические данные, то можно с уверенностью сказать, что в ближайшее время будут найдены средства улучшить и эти показатели кристаллических триодов.

9. ШУМЫ ТОЧЕЧНЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТРИОДОВ

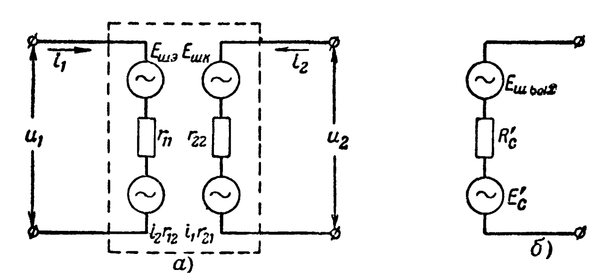
Как уже говорилось выше, шумы точечного кристаллического триода в значительной степени определяются наличием точечных контактов и поэтому имеют частотный спектр, схожий со спектром контактных шумов. Мощность шумов убывает с ростом частоты, так что в пределах полосы частот, граничные частоты которой относятся как 2 : 1, распределение мощности шумов по частоте можно считать равномерным.

В эквивалентной схеме кристаллического триода шумы могут быть учтены при помощи двух генераторов шумов и

э. д. с., включенных в цепь эмиттера и в цепь коллектора так, как это изображено на фиг. 19,*а*. Их можно пересчитать в эквивалентную схему выхода так, как это показано на фиг. 19,*б*.

В пределах полосы 500 — 1 000 *гц* э. д. с. генераторов шумов имеют для полосы в 1 *гц* приблизительно следующие величины: в цепи эмиттера $E_{ш.э} = 1$ *мкв*; в цепи коллектора $E_{ш.к} = 100$ *мкв*.

Ниже при рассмотрении усилительных схем будет показано, что если на вход кристаллического триода вклю-



Фиг. 19. Эквивалентные генераторы э. д. с. шумов.
а — в полной эквивалентной схеме; *б* — пересчитанные на выход триода.

чен источник входного сигнала с э. д. с. E_c и внутренним сопротивлением R_c, то эквивалентная схема выхода кристаллического триода может быть изображена в виде некоторого эквивалентного генератора с э. д. с.

$$E_c' = E_c \cdot \frac{r_{21}}{r_{11} + R_c}$$

и внутренним сопротивлением

$$R_c' = r_{22}\left[1 - \frac{a \cdot r_{21}}{r_{11} + R_c}\right].$$

Пользуясь этими формулами, пересчитаем шумовую э. д. с. из цепи эмиттера в эквивалентную схему выхода и просуммируем с э. д. с. шумового генератора в цепи коллектора.

Так как шумовые генераторы в цепи эмиттера и в цепи коллектора в какой-то степени являются взаимозависимыми, то при расчете средней квадратичной шумовой э. д. с. в эквивалентной схеме выхода эту взаимную зависимость

следует учесть при помощи коэффициента корреляции C. Коэффициент этот для кристаллических триодов точечного типа может иметь величину от — 0,8 до + 0,4 в зависимости от образца триода. Таким образом, на выходе триода получим шумовой генератор с квадратом э. д. с. шумов, равным

$$E^2_{ш.\,вых} = a^2 \overline{E}^2_{ш.\,э} + \overline{E}^2_{ш.\,к} + 2aC\sqrt{\overline{E}^2_{ш.\,э} \cdot \overline{E}^2_{ш.\,к}}, \qquad (46)$$

где

$$a = \frac{r_{21}}{r_{11} + R_c} = \frac{r_в + r_y}{R_c + r_э + r_y}.$$

Однако это справедливо только для частоты 1 000 *гц* в полосе 1 *гц*. Чтобы перейти к произвольной полосе частот, воспользуемся известной зависимостью мощности шумов от частоты и будем считать, что э. д. с. шумов эквивалентных генераторов в цепи эмиттера и коллектора может быть получена для любой частоты путем умножения соответствующей величины для частоты 1 000 *гц* на множитель $\sqrt{\frac{1\,000}{f}}$. Для получения квадрата э. д. с. шумов в полосе частот $f_1 - f_2$ произведем суммирование по элементарным полосам частот и получим:

$$\overline{E}^2_{ш.\,вых\,(f_1,\,f_2)} = \left(a^2 \overline{E}^2_{ш.\,э} + \overline{E}^2_{ш.\,к} + \right.$$

$$\left. + 2aC\sqrt{\overline{E}^2_{ш.\,э} \cdot \overline{E}^2_{ш.\,к}}\right) \cdot 1\,000 \ln \frac{f_2}{f_1}. \qquad (47)$$

Таким образом учитываются собственные шумы кристаллического триода. С этими шумами суммируются усиленные флюктуационные шумы активного сопротивления генератора сигнала, включенного на вход кристаллического триода. Квадрат э. д. с. шумов активного сопротивления R_c для рассматриваемой нами полосы частот равен

$$\overline{E}^2_{ш.\,ф} = 4\,kTBR_c. \qquad (48)$$

Пересчитаем эту э. д. с. на выход триода;

$$\overline{E}^2_{ш.ф.\,вых} = a^2 \cdot 4kTBR_c \qquad (49)$$

и просуммируем с квадратом э. д. с. собственных шумов:

$$\overline{E}^2_{ш.\,вых.\,полн} = a^2 \cdot 4kTBR_c + (a^2\overline{E}^2_{ш.\,э} + \overline{E}^2_{ш.\,к} + 2\,aC\sqrt{\overline{E}^2_{ш.\,э} \cdot \overline{E}^2_{ш\,к}}) \cdot 1\,000 \ln \frac{f_2}{f_1}. \qquad (50)$$

Если бы собственные шумы кристаллического триода были равны нулю, то мы имели бы на выходе только усиленную триодом мощность шумов активного сопротивления генератора входного сигнала. Для оценки собственных шумов кристаллического триода будем пользоваться коэффициентом шума, который показывает, во сколько раз мощность шумов на выходе реального кристаллического триода превосходит мощность шумов на выходе такого же нешумящего триода. Поделив выражение (50) на выражение (49), получим значение коэффициента шума (51) в относительных единицах. Для того чтобы перевести коэффициент шума в децибелы, необходимо взять десятичный логарифм от выражения (51) и помножить его на 10. Коэффициент шума в относительных единицах для схемы с общим управляющим электродом оказывается равным:

$$k_ш = \frac{\overline{E}^2_{ш.\,вых.\,полн}}{\overline{E}^2_{ш.\,ф.\,вых}} = 1 + \frac{1}{4\,kTBR_c}(\overline{E}^2_{ш.\,э} + \frac{2C}{a} \cdot \sqrt{\overline{E}^2_{ш.\,э} \cdot \overline{E}^2_{ш.\,к}} + \frac{1}{a^2} \cdot \overline{E}^2_{ш.\,к}) \cdot 1\,000 \ln \frac{f_2}{f_1}, \qquad (51)$$

где $B = \Delta f = (f_2 - f_1)$ — рассматриваемая эффективная полоса частот, *гц*;

$k = 1{,}38 \cdot 10^{-23} \frac{вт \cdot сек}{°K}$ — постоянная Больцмана;

$C = -0{,}8 \div +0{,}4$ — коэффициент корреляции;

T — температура в градусах абсолютной шкалы;

$E_{ш.э} = 1$ *мкв* — э. д. с. эквивалентного генератора шумов в цепи эмиттера на частоте 1 000 *гц*;

$E_{ш.к} = 100$ *мкв* — э. д. с. эквивалентного генератора шумов в цепи коллектора на частоте 1 000 *гц*.

Для случая включения кристаллического триода по схеме с общим эмиттером и с общим коллектором значение коэффициента шума может быть определено следующим выражением:

$$k_ш = 1 + \frac{1}{4kTBR_c}\left(d^2 \overline{E}^2_{ш.э} + 2C\sqrt{db\overline{E}^2_{ш.э}\cdot\overline{E}^2_{ш.к}} + b^2\overline{E}^2_{ш.к}\right)\cdot 1\,000 \ln\frac{f_2}{f_1}. \qquad (52)$$

Для схемы с общим эмиттером:

$$d = 1 - \frac{1}{a} = 1 - \frac{r_{11} + R_c}{r_{21}} = \frac{R_c + r_в + r_y}{r_в - r_э};$$

$$b = -\frac{1}{a} = -\frac{R_c + r_{11}}{r_{21}} = \frac{R_c + r_y + r_э}{r_в - r_э}. \qquad (53)$$

Для схемы с общим коллектором:

$$d = \frac{1}{a} = \frac{R_c + r_{11}}{r_{21}} = \frac{R_c + r_к + r_y}{r_к};$$

$$b = \frac{1}{a} - 1 = \frac{R_c + r_{11}}{r_{21}} - 1 = \frac{R_c + r_y}{r_к}. \qquad (54)$$

В некоторых случаях коэффициент шумов не характеризует полностью свойства усилительного каскада, и появляется необходимость подсчитать максимальное превышение сигнала над шумами, которое может быть получено в данном устройстве. Для этого необходимо сравнить квадрат полного значения э. д. с. шумов на выходе с максимальным значением квадрата э. д. с. того полезного выходного сигнала, который соответствует максимально допустимым искажениям. Можно подсчитать, что для декадной полосы частот (т. е. для полосы, крайние частоты которой относятся как 1 : 10) максимально возможное превышение сигнала над шумами γ_{10} составляет около 70 *дб*. Очевидно, что для более широкой полосы мощность шумов на выходе будет больше и превышение сигнала над шумами упадет, тогда как для более узких полос $\left(\frac{f_2}{f_1} = m < 10\right)$ мощность шумов на выходе будет меньше и превышение сигнала над шумами может быть достигнуто большее. Максимальное превышение сигнала над шумами γ_m для любой полосы частот может быть определено через

максимальное превышение сигнала над шумами для декадной полосы частот следующим образом:

$$\gamma_m=\gamma_{10}-10\lg\lg m=\left[70-10\lg\left(\lg\frac{f_2}{f_1}\right)\right]. \qquad (55)$$

Как уже было сказано, мощность шумов кристаллического триода падает с ростом частоты, причем приблизительно по 11 *дб* на декаду, и на частоте 1 *мггц* коэффициент шума кристаллического триода равен примерно 25—30 *дб*. Следует помнить, что все приводимые данные относятся к точечному триоду. Слоистые триоды имеют значительно более низкий коэффициент шума, составляющий 10—15 *дб* на частоте 1 000 *гц*. Кроме того, имеется возможность дальнейшего снижения шумов в слоистых триодах. Тем не менее, ввиду того, что слоистые триоды не могут заменить точечные триоды во всех схемах, снижение шумов точечных триодов имеет в настоящее время большое значение.

Некоторого снижения шумов можно добиться рациональным выбором параметров схемы и режима работы триода. Выше было также показано, что различные варианты включения кристаллического триода дают различные шумовые показатели. Основным параметром, оказывающим влияние на шумовые свойства кристаллического триода, следует считать напряжение на коллекторе, так как мощность шумов на выходе кристаллического триода растет приблизительно линейно с ростом напряжения на коллекторе. Зависят шумы также и от величины тока эмиттера и от сопротивления генератора сигнала на входе каскада R_c.

Оптимальное с точки зрения шумовых показателей сопротивление источника сигнала обычно имеет величину, отличную от того значения, при которой выполняются условия согласования. Кроме того, оптимальная с точки зрения шумов величина этого сопротивления не всегда удовлетворяет условию устойчивой работы каскада. С учетом обеспечения устойчивой работы наилучшие шумовые соотношения дает схема с общим управляющим электродом. Близкие к ним, но несколько худшие соотношения дает схема с общим эмиттером.

Для получения малых шумов напряжение на коллекторе следует выбирать по возможности не превышающим 20 *в* при токе эмиттера порядка 0,5 *ма*.

Шумы оказывают также большое влияние на работу импульсных схем. За счет шумов ухудшается форма им-

пульсов и значительно снижается стабильность частоты следования и длительности импульсов.

Шумы вакуумных триодов характеризуются обычно либо условным шумовым сопротивлением, включенным на вход триода, либо напряжением шумов на входе триода для некоторой определенной полосы частот. В диапазоне звуковых частот и в диапазонах длинных, средних и коротких волн мощность шумов вакуумных триодов можно считать равномерно распределенной по частоте. Если задаться некоторой полосой, например в 5 000 *гц*, то можно считать, что для этой полосы напряжение шумов на входе триода, которым характеризуются его шумовые свойства, будет неизменным по диапазону. В кристаллических триодах точечного типа шумы в основном определяются наличием точечных контактов. Это—так называемые контактные шумы. В спектре этих шумов преобладают низкочастотные составляющие, поэтому для той же самой полосы в 5 000 *гц* шумовые свойства кристаллического триода с ростом частоты будут улучшаться. Для того чтобы иметь возможность сравнить шумы ламп с шумами кристаллического триода, необходимо выразить их в сравнимых величинах.

Известно, что для полосы в 5 000 *гц* эквивалентное входное шумовое напряжение для пентодов-усилителей типа 6К3, 6Ж8 и 6К4 имеет значение порядка 0,5—0,9 *мкв*, а для триодов-усилителей типа 6С2С, 6С1Ж и 6Ж4 (в триодном включении) порядка 0,2—0,3 *мкв*.

Если рассчитать эквивалентное входное шумовое напряжение для кристаллического триода, пересчитывая шумовой генератор цепи коллектора в цепь эмиттера и переходя от полосы в 1 *гц* к полосе в 5 000 *гц*, то на частоте 1 000 *гц* $U_{ш.\,вх} \approx 500$ *мкв*, на частоте 100 *кгц* $U_{ш.вх} \approx 50$ *мкв* и на частоте 10 *мггц* $U_{ш.вх} \approx 5$ *мкв*.

Очевидно, что хотя с ростом частоты шумовые свойства точечного триода и улучшаются, тем не менее по этому показателю он значительно уступает вакуумной лампе.

В заключение следует указать, что для определения коэффициента шума двух последовательно соединенных каскадов на кристаллических триодах можно пользоваться той же самой формулой, что и для каскадов на вакуумных лампах:

$$k_{ш12} = k_{ш1} + \frac{k_{ш2} - 1}{k_p}, \qquad (56)$$

где $k_{ш12}$ — коэффициент шума обоих каскадов;

$k_{ш1}$ и $k_{ш2}$ — коэффициенты шума первого и второго каскадов в отдельности.

Из формулы (56) видно, что коэффициент шума всего тракта будет определяться собственными шумами и усилением по мощности первого каскада. Для получения наименьших шумов в тракте первый каскад должен обладать минимальными собственными шумами и максимальным усилением по мощности.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ
УСИЛИТЕЛЬНЫЕ СХЕМЫ

10. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ В УСИЛИТЕЛЬНОМ КАСКАДЕ

Выше были рассмотрены эквивалентные схемы кристаллического триода, изображенные как в виде Т-образной схемы сопротивлений, так и в виде П-образной схемы проводимостей.

Поскольку в настоящее время более употребительной является схема сопротивлений (что обусловлено методикой снятия характеристик кристаллического триода), будем рассматривать основные соотношения в усилительном каскаде на кристаллическом триоде, основываясь на эквивалентной схеме сопротивлений. В случае необходимости все полученные соотношения могут быть пересчитаны к проводимостям, для этого необходимо только рассчитать величину Δ данной схемы, которая и будет являться модулем перехода.

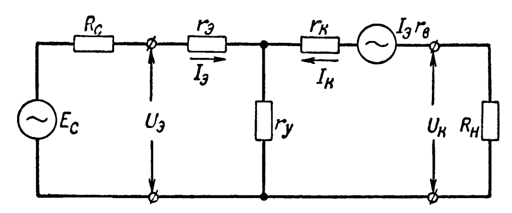
На фиг. 11,*б* изображена эквивалентная схема кристаллического триода, величины которой на основании уравнений (1) и (2) выражены в параметрах четырехполюсника, а на фиг. 12 приведена эта же самая схема, но ее величины выражены в параметрах триода. Зависимость между теми и другими параметрами определяется выражениями (3) — (10).

Включим на вход такого триода эквивалентный источнику сигнала генератор с э. д. с. E_c и внутренним сопротивлением R_c, а на выход триода — сопротивление нагрузки $R_н$. Эквивалентная схема получившегося усилительного каскада показана на фиг. 20. При расчете та-

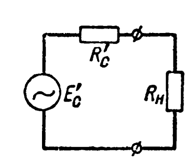
кого каскада нам может потребоваться найти коэффициент усиления по напряжению, коэффициент усиления по мощности, условия согласования на входе и выходе, входное и выходное сопротивления каскада, а также определить устойчивость каскада.

Сначала определим выходное сопротивление каскада. Для этого весь каскад вместе с источником сигнала представим в виде эквивалентного генератора э. д. с. с внутренним сопротивлением $R_{вых}$, как это изображено на фиг. 21.

Чтобы выразить напряжение и мощность на выходе каскада с кристаллическим триодом, необходимо пере-



Фиг. 20. Эквивалентная схема усилительного каскада.



Фиг. 21. Эквивалентная схема выхода.

считать эквивалентную схему фиг. 20 (при условии ее работы на ту же нагрузку) в эквивалентную схему фиг. 21. Обозначая эмиттерный зажим кристаллического триода буквой *э*, коллекторный буквой *к* и общую точку (зажим управляющего электрода) буквой *у*, напишем выражения для напряжения на эмиттере и на коллекторе относительно общей точки.

Напряжение на эмиттере со стороны генератора сигнала может быть записано следующим образом:

$$U_э = E_c - R_c \cdot I_э. \tag{57}$$

Вместе с тем это же самое напряжение со стороны кристаллического триода может быть записано на основании выражения (1) в таком виде:

$$U_э = r_{11} \cdot I_э + r_{12} \cdot I_к. \tag{58}$$

Аналогично для зажима *к* может быть получено со стороны нагрузки

$$U_к = - R_н \cdot I_к \tag{59}$$

и со стороны кристаллического триода

$$U_к = r_{21} \cdot I_э + r_{22} \cdot I_к . \qquad (60)$$

Решая последние четыре уравнения относительно напряжения на коллекторе и выражая его через ток коллектора и э. д. с. генератора сигнала, получаем выражение

$$U_к = \left(r_{22} - \frac{r_{12} \cdot r_{21}}{r_{11} + R_c} \right) \cdot I_к + \frac{r_{21}}{r_{11} + R_c} \cdot E_c, \qquad (61)$$

определяющее величину э. д. с. эквивалентного генератора усиленного сигнала на выходе и величину его внутреннего сопротивления

$$E'_c = \frac{r_{21}}{r_{11} + R_c} \cdot E_c; \qquad (62)$$

$$R_{вых} = r_{22} - \frac{r_{12} \cdot r_{21}}{r_{11} + R_c} . \qquad (63)$$

Коэффициент усиления по напряжению для точечных триодов определяют обычно как отношение напряжения на нагрузке к э. д. с. генератора сигнала на входе:

$$k = \frac{U_к}{E_c} = \frac{r_{21} \cdot R_н}{(r_{11} + R_c)(r_{22} + R_н) - r_{12} \cdot r_{21}} . \qquad (64)$$

Рассчитаем коэффициент усиления по мощности. Мощность, отдаваемая в нагрузку эквивалентным генератором э. д. с. на выходе, определится величиной его э. д. с., внутренним сопротивлением и сопротивлением нагрузки:

$$P_н = R_н \left[\frac{E'_c}{R_{вых} + R_н} \right]^2 . \qquad (65)$$

Отношение мощности в нагрузке к номинальной мощности генератора сигнала на входе (т. е. к мощности, отдаваемой генератором сигнала при условии полного согласования на входе) даст коэффициент усиления по мощности

$$k_p = \frac{R_н (E'_c)^2}{(R_{вых} + R_н)^2} \cdot \frac{4R_c}{E_c^2} = \frac{4R_н \cdot R_c}{(R_{вых} + R_н)^2} \cdot \left(\frac{r_{21}}{r_{11} + R_c} \right)^2 . \qquad (66)$$

Максимальное усиление по мощности будет иметь место при условии полного согласования как на входе,

так и на выходе кристаллического триода. Входное сопротивление кристаллического триода, действующее между входными зажимами кристаллического триода, нагруженного на сопротивление $R_н$, равно:

$$R_{вх} = r_{11} - \frac{r_{12} \cdot r_{21}}{r_{22} + R_н}. \qquad (67)$$

Как видно из формул (63) и (67), выходное сопротивление зависит от величины внешнего сопротивления, включенного на вход кристаллического триода, а входное сопротивление от величины сопротивления нагрузки, включенного на выходе кристаллического триода. Исследование формулы (66) дает следующие оптимальные значения внешних сопротивлений, обеспечивающих полное согласование:

$$R_{с.\,опт} = \sqrt{\frac{r_{11}}{r_{22}} \cdot \Delta} = r_{11} \cdot \sqrt{1 - \delta} = r_{11} \cdot \sqrt{1 - \frac{r_{12} \cdot r_{21}}{r_{11} \cdot r_{22}}}; \qquad (68)$$

$$R_{н.\,опт} = \sqrt{\frac{r_{22}}{r_{11}} \cdot \Delta} = r_{22} \sqrt{1 - \delta} = r_{22} \sqrt{1 - \frac{r_{12} \cdot r_{21}}{r_{11} \cdot r_{22}}}. \qquad (69)$$

Коэффициент усиления по мощности в случае полного согласования равен:

$$k_{р.\,макс} = \frac{r_{21}^2}{r_{11} \cdot r_{12}} \cdot \frac{1}{(1 + \sqrt{1 - \delta})^2}. \qquad (70)$$

Все выражения, полученные для схемы с общим управляющим электродом, останутся справедливы и для других случаев включения кристаллического триода с той лишь разницей, что связь между параметрами четырехполюсника и параметрами кристаллического триода для каждого случая будет выражаться своей группой формул. Для схемы с общим управляющим электродом это были формулы (3)—(10), для схемы с общим эмиттером формулы (11)—(18) и для схемы с общим коллектором формулы (19)—(26).

Приведем еще выражения усиления по току в режиме максимального усиления мощности:

$$k_i = \frac{r_{21}}{r_{22}} \cdot \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \delta}} \qquad (71)$$

и усиления по напряжению в режиме максимального усиления мощности:

$$k = \frac{r_{21}}{2r_{11}} \cdot \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \delta}} . \qquad (72)$$

Следует учитывать, что максимальное усиление по мощности не всегда может быть получено в каскаде на точечном триоде. Ранее была рассмотрена устойчивость точечного триода при условии короткого замыкания его входа и выхода и было указано, что это является случаем наименее устойчивого состояния кристаллического триода. Включение внешних сопротивлений на вход и выход точечного триода увеличивает его устойчивость, однако оптимальные значения внешних сопротивлений, полученные из условия получения максимального усиления по мощности, могут оказаться недостаточными для обеспечения устойчивости работы каскада. Это не распространяется на триоды слоистые, так как они всегда являются устойчивыми в короткозамкнутом состоянии. Неустойчивое состояние в схемах со слоистыми триодами может наступить лишь при наличии внешней положительной обратной связи.

Условия устойчивости каскадов на кристаллических триодах точечного типа имеют большое значение не только для определения устойчивости работы усилительного каскада, но и для расчетов каскадов, использующих именно неустойчивые режимы кристаллических триодов, как, например, схемы генераторов и импульсные схемы с одним или несколькими положениями равновесия.

11. УСТОЙЧИВОСТЬ КАСКАДА С КРИСТАЛЛИЧЕСКИМ ТРИОДОМ

Выше было показано, что устойчивость работы кристаллического триода определяется неравенством (32) при условии, что вход и выход кристаллического триода замкнуты накоротко.

При включении внешних сопротивлений в схему кристаллического триода детерминант цепи изменится, причем при включении внешнего сопротивления в левое плечо Т-образной схемы его величина добавится только к сопротивлению r_{11}, при включении сопротивления в правое плечо схемы его величина добавится только к сопротивлению r_{22}, а при включении внешнего сопротивления в общую ветвь входа и выхода его величина добавляется ко всем четырем сопротивлениям, характеризующим четырехполюсник.

Допустим, что внешние сопротивления включены последовательно в цепь каждого из электродов кристаллического триода так, как это изображено на фиг. 22. В этом случае детерминант цепи, имевший прежде вид:

$$\Delta = \begin{vmatrix} r_{11}; & r_{12} \\ r_{21}; & r_{22} \end{vmatrix} = r_{11} \cdot r_{22} - r_{12} \cdot r_{21},$$

станет после включения внешних сопротивлений в цепи кристаллического триода равным:

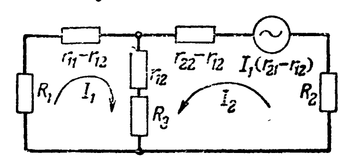
$$\Delta' = \begin{vmatrix} r_{11} + R_1 + R_3; & r_{12} + R_3 \\ r_{21} + R_3; & r_{22} + R_2 + R_3 \end{vmatrix} =$$

$$= (r_{11} + R_1 + R_3)(r_{22} + R_2 + R_3) - (r_{12} + R_3)(r_{21} + R_3). \quad (73)$$

Для того чтобы оценить влияние сопротивлений, включенных в ту или иную цепь кристаллического триода, на устойчивость каскада, перейдем от детерминанта цепи к коэффициенту устойчивости каскада, который обозначим:

$$\delta' = \frac{(r_{21} + R_3)(r_{12} + R_3)}{(r_{11} + R_1 + R_3)(r_{22} + R_2 + R_3)} = \frac{R_{21} \cdot R_{12}}{R_{11} \cdot R_{22}}. \quad (74)$$

Из формулы (74) видно, что включение внешних сопротивлений на вход и выход кристаллического триода увеличивает устойчивость каскада, так как при этом увеличивается знаменатель коэффициента устойчивости каскада (условием устойчивости и в этом случае будет являться такое соотношение между сопротивлениями, при котором коэффициент устойчивости будет меньше единицы).



Фиг. 22. Общий случай включения сопротивлений во внешних цепях кристаллического триода.

Определить влияние включения сопротивления в общую ветвь можно, только зная порядок величин сопротивлений r_{11} и др. Сопротивления r_{21} и r_{22} имеют порядок тысяч ом, поэтому добавление к ним сопротивления R_3 не окажет большого влияния на работу каскада, сопротивление r_{11} имеет обычно порядок нескольких сотен ом, а сопротивление r_{12} имеет порядок десятков ом, поэтому добавление сопротивления R_3 может значительно повысить коэффициент устойчивости каскада, так что он превзойдет единицу. Каскад в этом случае сделается неустойчивым. Таким образом,

включение сопротивления в общую ветвь в значительной степени ухудшает устойчивость каскада.

Физически это можно пояснить следующим образом. Включение внешнего сопротивления в цепь общего электрода кристаллического триода дает дополнительную положительную обратную связь по току, включаемую последовательно со стороны входа, которая действует совместно с собственной обратной связью кристаллического триода. Увеличение положительной обратной связи может привести каскад к самовозбуждению. Входное сопротивление при этом становится равным нулю или даже отрицательным.

Следует оговориться, что все приведенные выше соображения справедливы только для достаточно низких частот. С ростом частоты изменяются величины некоторых параметров схемы (и фаза этих величин), которые с ростом частоты нельзя уже считать чисто активными.

Ранее было показано, что крутизна кристаллического триода является, вообще говоря, величиной комплексной и модуль ее уменьшается с частотой (так как с частотой уменьшается усиление по току). Уменьшение крутизны говорит об увеличении устойчивости триода, что ведет к увеличению устойчивости всего каскада в целом.

Для схем генераторов или для спусковых схем важно иметь вольтамперные характеристики входа с падающим участком, что соответствует отрицательному сопротивлению входа. Сопротивления внешних цепей для этого случая легко могут быть получены из тех же самых неравенств, которые были использованы для определения устойчивости каскада, но знак неравенства при этом следует изменить на обратный. В качестве примера можно привести автогенератор на кристаллическом триоде, у которого в цепь общего электрода включен настроенный на генерируемую частоту колебательный контур. Если параметры контура выбраны таким образом, что на требуемой частоте его резонансное сопротивление дает положительную обратную связь, обеспечивающую самовозбуждение, то получим автоколебания на резонансной частоте колебательного контура.

12. ЭЛЕМЕНТЫ РАСЧЕТА УСИЛИТЕЛЬНЫХ СХЕМ

При расчете усилительных схем на кристаллических триодах приходится сталкиваться с двумя видами трудностей. Первый из них вызывается наличием сильной положительной обратной связи, вследствие чего методика расчета при-

нимает несколько необычный вид. Второй вид трудностей связан с несколько непривычной системой параметров, обозначений и индексов.

Если взять семейство выходных характеристик точечного кристаллического триода, провести нагрузочную прямую и произвести расчет тем же порядком, что и для вакуумного триода, то будет допущена существенная ошибка в выборе режима. Кроме того, при этом не будет получено никаких данных о выборе параметров цепи входа. Объясняется это тем, что статические характеристики вакуумного триода снимаются при отсутствии обратной связи, в силу чего напряжение на входе (на сетке лампы) можно считать независимым от изменений тока и напряжения на аноде. В отличие от этого для кристаллического триода статические характеристики снимаются при действующей обратной связи.

Для вакуумного триода имеем три независимых переменных: напряжение на сетке, анодный ток и напряжение на аноде, которые связываются между собой одним уравнением, которое графически изображается одним семейством характеристик, достаточным для расчета всех параметров.

Для кристаллического триода имеем не три, а четыре независимых переменных, связь между которыми устанавливается двумя системами уравнений, изображаемыми двумя семействами характеристик. Полный расчет всех необходимых величин может быть произведен только по двум семействам характеристик.

Для графоаналитического расчета наиболее удобными являются семейства входных и выходных характеристик (фиг. 23).

Расчет осуществляется следующим образом:

1. Наносится линия максимально допустимой мощности рассеивания на коллекторе $P_{к.\,макс}$ (фиг. 23,*а*).

2. Выбирается напряжение источника питания коллектора $E_к$.

3. Выбирается нагрузка и проводится нагрузочная прямая (нагрузочная прямая не должна пересекать линии $P_{к.\,макс}$).

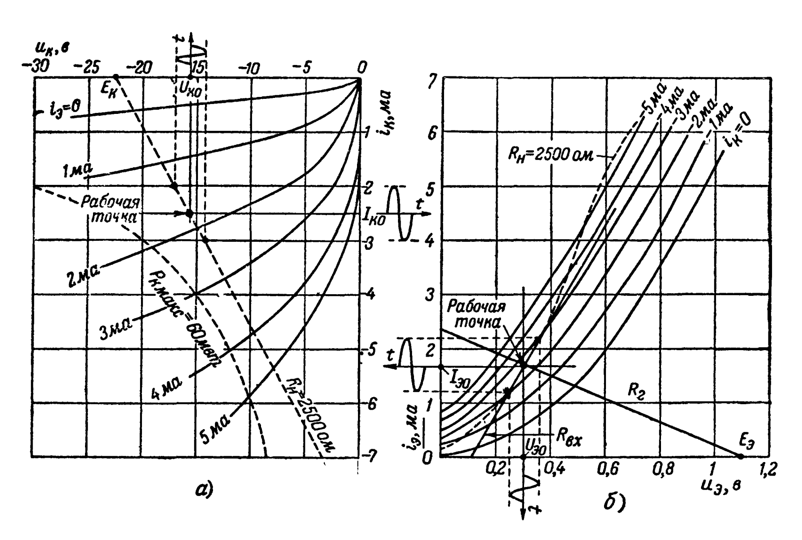
4. Нагрузочная прямая по точкам ($i_к$, $i_э$) переносится на семейство входных характеристик (фиг. 23,*б*). Наклон перенесенной на семейство входных характеристик нагрузочной прямой дает входное сопротивление кристаллического триода при работе на данную нагрузку. Будем называть ее линией входных сопротивлений. Кривизной линии вход-

ных сопротивлений определяется коэффициент нелинейных искажений.

5. Выбираем на линии входных сопротивлений наиболее линейный участок. Рабочую точку выбираем в середине этого участка.

6. Определяем входное сопротивление в выбранной точке.

7. Проектируем рабочий участок на ось напряжений и получаем удвоенную амплитуду входного сигнала.



Фиг. 23. Выбор рабочей точки и расчет режима по двум семействам характеристик.

8. Проектируем рабочую точку на ось напряжений и получаем напряжение на эмиттере (постоянную составляющую), необходимое для работы в выбранном режиме.

9. Через рабочую точку проводим прямую, наклон которой равен внутреннему сопротивлению генератора сигнала, включенного на вход усилителя. Пересечение этой прямой с осью напряжений дает э. д. с. источника смещения в цепи эмиттера $E_э$ при последовательной подаче смещения. При параллельной подаче смещения задаемся величиной $E_э$. Наклон прямой, проходящей через точку $E_э$ и рабочую точку, даст величину гасительного сопротивления.

10. Проектируем границы рабочего участка на ось токов и получаем $i_{э.\,макс}$ и $i_{э.\,мин}$.

11. Переносим рабочую точку и пределы изменения тока эмиттера на семейство выходных характеристик и определяем пределы изменения тока и напряжения на коллекторе.

12. Рассчитываем статические параметры в рабочей точке.

13. Производим расчет всех требуемых величин.

При соединении нескольких каскадов на кристаллических триодах возникают трудности согласования высокоомного выхода предыдущего каскада с низкоомным входом рассматриваемого каскада. Для этой цели применяются согласующие трансформаторы.

К низкочастотным согласующим трансформаторам предъявляются следующие требования: минимальный вес и габариты; обеспечение требуемой полосы пропускания; высокий к. п. д.

В своей основе расчет согласующего трансформатора ничем не отличается от расчета выходного трансформатора и осуществляется в следующем порядке:

1. Задаемся полосой частот от нижней звуковой частоты $F_н$ до верхней звуковой частоты $F_в$.

2. Задаемся допустимым завалом частотной характеристики на нижней частоте $\sigma_н$.

3. Определяем согласуемые сопротивления $R_{вх}$ и $R_{вых}$.

4. Рассчитываем для рассматриваемого триода коэффициент усиления по напряжению в режиме холостого хода:

$$\mu = \frac{U_{вых\, х.х}}{U_{вх}} = \frac{r_{21}}{r_{11}}. \quad (75)$$

5. Определяем коэффициент трансформации

$$n = \sqrt{\frac{R_{вх}}{R_{вых}}}. \quad (76)$$

6. Определяем коэффициент усиления на средней частоте

$$k_{ср} = \mu \cdot q \cdot n, \quad (77)$$

где

$$q = \frac{R'_{вх}}{R_{вых} + R'_{вх} + r} \approx 0{,}5;$$

$R'_{вх}$ — пересчитанное в первичную обмотку входное сопротивление;

r — полное активное сопротивление обмоток трансформатора, равное сумме активного сопротивления первичной обмотки (r_1) и активного сопротивления вторичной обмотки, пересчитанного в первичную обмотку (r'_2).

7. Рассчитываем необходимую для соблюдения заданного $\sigma_н$ величину индуктивности первичного обмотки:

$$L_1 = \frac{R_э}{\Omega_н \sqrt{\sigma_н^2 - 1}}, \tag{78}$$

где

$$R_э = \frac{R'_{вх}(R_{вых} + r_1)}{R'_{вх} + R_{вых} + r_1}; \quad \Omega_н = 2\pi F_н.$$

8. По известным (из расчета режима) величинам токов и значению индуктивности L_1 производим выбор сердечника, расчет числа витков в обмотках и диаметра провода.

Расчет настроенной нагрузки для усилителей высокой и промежуточной частот ничем не отличается от общеизвестного метода. Следует лишь указать, что при расчете контура нужно учитывать, что малое входное сопротивление следующего каскада в значительной степени шунтирует контур, поэтому для обеспечения заданной полосы пропускания приходится прибегать к неполному или к трансформаторному подключению входа каскада к контуру.

В периодической литературе имеется ряд статей, в которых предлагается косвенный метод расчета параметров усилительных схем на кристаллических триодах. При этом авторы исходят из «дуального» подобия характеристик усиления сеточным характеристикам вакуумного триода, а выходных характеристик — анодным характеристикам. Ток эмиттера при этом заменяется некоторым условным сеточным напряжением эквивалентного вакуумного триода, ток коллектора — «анодным напряжением» и напряжение коллектора — «анодным током». Затем по характеристикам реального кристаллического триода, приведенным к характеристикам условного «эквивалентного вакуумного триода» путем замены токов на условные напряжения и напряжений на условные токи, производится расчет в том же порядке, как и при расчете схемы с вакуумным триодом.

После этого полученные в результате расчета величины токов, напряжений и т. д. пересчитываются в обратные при помощи коэффициента пересчета, выражающего соотношение реальных токов и условных напряжений (или наоборот).

Из этого метода, основанного на формальном сходстве характеристик, делаются выводы, что и схемы с кристаллическими триодами должны быть «дуальными» или «двойственно-эквивалентными» по отношению к схемам с вакуумными триодами; в подтверждение этого приводится вариант двухтактной схемы, являющейся «двойственно-эквивалентным» отображением обычной двухтактной схемы на вакуумных триодах.

Такой метод имеет ряд сомнительных мест, заключающихся уже хотя бы в том, что расчет режима производится по одному семейству характеристик. Кроме того, он не представляет никаких удобств по сравнению с непосредственным методом расчета.

Имеется точка зрения, что метод «двойственной эквивалентности» является попыткой приблизить методику расчета каскадов на кристаллических триодах к методике расчета каскадов на вакуумных триодах. Против этого можно возразить, что вся предлагаемая теория анализа и расчета каскадов на кристаллических триодах почти ничем не отличается от общей теории усилительных схем на вакуумных триодах. Это подтверждается полной идентичностью основных уравнений эквивалентных схем, особенно, если их сравнивать с вакуумным триодом, работающим на сверхвысоких частотах.

Различие в теории усилительных схем на кристаллических и вакуумных триодах проявляется в трех следующих пунктах:

1. Активный характер всех проводимостей кристаллического триода, не вносящий существенных изменений в расчеты на достаточно низких частотах.

2. Наличие обратной связи в статическом режиме, приводящее к необходимости расчета по двум семействам характеристик.

3. Различный подход к определению выходного сопротивления и коэффициента устойчивости.

Последний пункт является наиболее серьезным отличием в методике расчета усилительных схем с обратной связью на вакуумных триодах и усилительных схем на кристаллических триодах.

Если рассматривать кристаллический триод как усилитель с обратной связью (как это сделано в § 6) и воспользоваться общей теорией усилительных схем, то можно показать, что для входного сопротивления будет получена та же самая формула (67):

$$R_{вх} = r_{11} - \frac{r_{12} \cdot r_{21}}{r_{22} + R_н},$$

тогда как для выходного сопротивления на основании этой теории

$$R_{вых} = r_{22} - \frac{r_{12} \cdot r_{21}}{r_{11}}. \qquad (79)$$

Сравнивая формулу (79) с формулой (63), замечаем, что в общей теории усилительных схем не учитывается влияние величины сопротивления, включенного на входе усилителя, на выходное сопротивление усилителя.

Очевидно, что такое допущение справедливо только при

$$r_{11} \gg R_c.$$

Аналогично не учитывается влияние сопротивления R_c и на устойчивость каскада.

На основании общей теории усилительных схем, устойчивость каскада может быть определена условием

$$K \cdot \beta < 1,$$

где K — коэффициент усиления по напряжению, рассчитанный как отношение напряжения на выходе усилителя к напряжению на его входе, а β — коэффициент обратной связи.

Рассматривая кристаллический триод как усилитель с обратной связью и вычисляя для него величину $K \cdot \beta$, получаем:

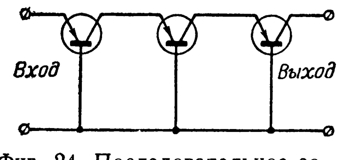
$$K \cdot \beta = \frac{r_{12} \cdot r_{21}}{r_{11} \cdot (r_{22} + R_н)}. \qquad (80)$$

Сравнивая формулы (80) и (74), видим, что $K \cdot \beta$ есть не что иное, как δ', но не учитывающее влияние R_c. Это также может быть справедливо только при условии $R_c \ll r_{11}$. Таким образом, если принять во внимание необходимость учитывать R_c, суммируя его с r_{11}, и необхо-

димость расчета режима по двум семействам характеристик, то можно вполне применять методы расчета усилителей на вакуумных триодах для расчета усилителей на кристаллических триодах.

13. ВАРИАНТЫ УСИЛИТЕЛЬНЫХ СХЕМ

Самым простым вариантом многокаскадного усилительного тракта является последовательное соединение однотипных каскадов, например, с общим управляющим электродом, без использования согласующих трансформаторов. На фиг. 24 схематически изображен такой трехкаскадный усилитель. Источники питания и смещения, а также другие вспомогательные элементы на схеме не показаны. В дальнейшем, разбирая вопросы построения многокаскадных усилителей, будем пользоваться такими упрощенными схемами.



Фиг. 24. Последовательное соединение каскадов с общим управляющим электродом.

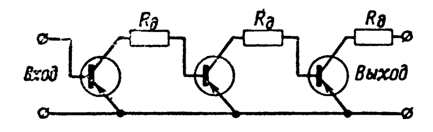
Усилитель, изображенный на фиг. 24, при правильном выборе рабочей точки может давать приблизительно трехкратное усиление по мощности. Такой невысокий коэффициент усиления по мощности (около 5 *дб*) на один каскад объясняется тем, что каскады работают при значительном рассогласовании, так как выходное сопротивление кристаллического триода во много раз превосходит его входное сопротивление. Недостатком такого усилителя, помимо малого коэффициента усиления, является также и то, что он имеет малое входное и большое выходное сопротивления, что затрудняет согласование на входе и выходе.

Если в такой схеме для согласования каскадов использовать межкаскадные согласующие трансформаторы, то коэффициент усиления по мощности может достичь 21 *дб* на каскад. При этом большое значение будет иметь оценка устойчивости каскада. Получить усиления в 21 *дб* на каскад при условии устойчивости работы очень трудно, поэтому часто приходится снижать усиление. В среднем с учетом необходимости удовлетворять условие устойчивой работы можно получить усиление по мощности порядка 15—20 *дб*.

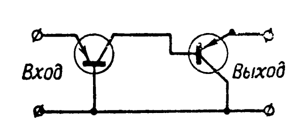
Схема с общим эмиттером (так же как и схема с общим катодом для вакуумных триодов) сулит большее усиление, чем схема с общим управляющим электродом для

кристаллических триодов (и аналогичная ей схема с общей сеткой для вакуумных триодов). Однако хотя эта схема и способна обеспечить большее усиление, но для увеличения ее устойчивости приходится включать дополнительное сопротивление в цепь коллектора. Величина сопротивления может быть выбрана таким образом, чтобы суммарное сопротивление цепи коллектора (собственное и внешнее дополнительное) равнялось приблизительно взаимному сопротивлению $r_в$. При этом усиление по току всей схемы будет приблизительно равно единице и усилитель будет работать устойчиво.

Упрощенная схема усилителя, состоящего из каскадов с включением кристаллического триода по схеме с общим



Фиг. 25. Последовательное соединение каскадов с общим эмиттером.



Фиг. 26. Каскад с общим коллектором в качестве „катодного повторителя" для согласования на выходе.

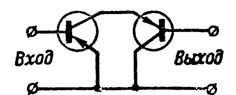
эмиттером, приведена на фиг. 25. В этом случае практически оказывается возможным получить усиление по мощности такого же порядка, что и в схеме с каскадами с общим управляющим электродом, т. е. 18—20 *дб*. Преимуществом такой схемы является возможность достигнуть такого же усиления по мощности, как и в предыдущей схеме без использования межкаскадных согласующих трансформаторов.

Соединение однотипных каскадов не является наилучшим и единственно возможным. Правильный выбор чередования каскадов с включением кристаллического триода по той или иной схеме может обеспечить высокие показатели работы усилительной схемы.

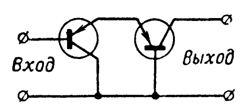
Для согласования выхода усилителя с низкоомной нагрузкой, например с кабелем, имеющим волновое сопротивление в 75 *ом*, очень удобно сочетание каскада с общим управляющим электродом в качестве усилителя мощности с каскадом с общим коллектором в качестве «катодного повторителя» для согласования сопротивлений. Такой усилитель, упрощенная схема которого приведена на фиг. 26, очень удобен для установки в кабельном разъеме, так как его входное и выходное сопротивления малы и легко могут быть согласованы с волновым сопротивлением кабеля. Он

может дать усиление по мощности порядка 15—20 *дб*. Недостатком является то, что выход этой схемы непосредственно соединен со слаботочным электродом (эмиттером), в результате чего схема дает лишь малые мощности на выходе.

Каскад на кристаллическом триоде, включенном по схеме с общим коллектором, способен давать усиление как в прямом, так и в обратном направлениях. Для получения больших величин выходных мощностей возьмем первый каскад усилителя с общим эмиттером, а второй каскад с общим коллектором, включенный в обратном направлении, как это



Фиг. 27. Обратное включение каскада с общим коллектором.



Фиг. 28. Каскад с общим коллектором, используемый для согласования на входе.

изображено на фиг. 27. Поскольку первый каскад с общим эмиттером особенно опасен в отношении самовозбуждения, то необходимо включение внешних элементов, обеспечивающих устойчивую работу. В качестве такого элемента может служить сопротивление, включенное в цепь эмиттера первого каскада. При помощи этого сопротивления обеспечивается отрицательная обратная связь, повышающая устойчивость каскада.

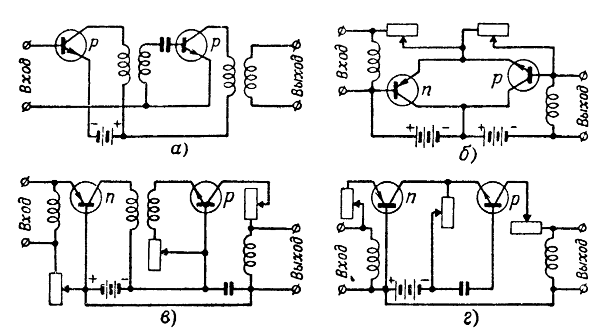
На фиг. 28 приведена упрощенная схема еще одного возможного варианта соединения каскадов. В этом варианте первый каскад, собранный на кристаллическом триоде, включенном с общим коллектором в прямом направлении, является согласующим каскадом, а второй каскад с общим управляющим электродом — усилителем мощности. Такой усилитель отличается высоким входным и высоким выходным сопротивлениями и может дать усиление по мощности до 30—35 *дб*.

Все вышесказанное относится к схемам с точечными триодами, имеющими $\alpha > 1$. Слоистые триоды наиболее часто используются в схеме с общим эмиттером. Для получения высоких выходных сопротивлений используется также схема с общим коллектором.

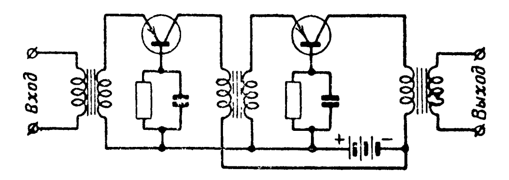
Можно добиться хороших результатов, чередуя каскады на кристаллических триодах с германием типа n с каскадами с германием типа p. Четыре варианта двухкаскадных

схем, использующих кристаллические триоды с германием типа p, показаны на фиг. 29.

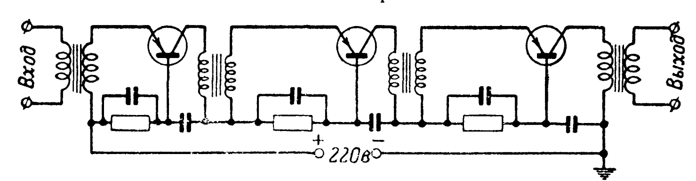
На фиг. 30 изображена практическая схема двухкаскадного усилителя с согласующими трансформаторами, с цепями смещения и с общим для обоих каскадов источником питания коллектора. Здесь применяется цепь смещения точно такого же вида, как и в схемах с вакуумным триодом.



Фиг. 29. Сочетание усилительных каскадов на триодах с германием типа n и p.



Фиг. 30. Двухкаскадный усилитель звуковых частот с автоматическим смещением на эмиттер.

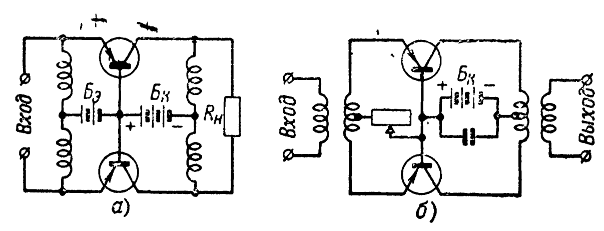


Фиг. 31. Трехкаскадный усилитель с последовательным питанием каскадов.

На фиг. 31 приводится схема трехкаскадного усилителя с согласующими трансформаторами и с общим источником питания коллекторов всех трех каскадов. В этой схеме коллекторы питаются от общего источника последовательно, тогда как в предыдущей схеме коллекторы питались парал-

лельно. По переменной составляющей цепь питания блокирована емкостями.

На фиг. 32,*а* изображена схема двухтактного усилителя звуковых частот, соответствующая двухтактной схеме вакуумного триода, трансформированной на основании принципа двойственной эквивалентности. Отличие этой схемы от обычной заключается в следующем. В трансформированной схеме, так же как и в обычной, каждый из триодов работает в течение одного полупериода. Но особенностью такой схемы является то, что нагрузка в ней не имеет средней точки.



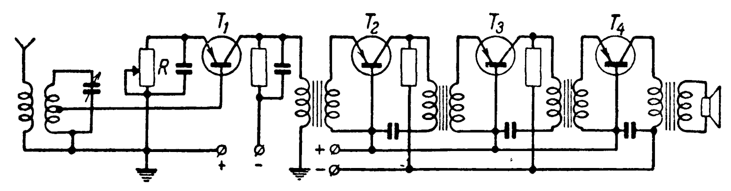
Фиг. 32. Двухтактные схемы.
а — „двойственная схема"; *б* — схема обычного вида.

Если в обычной двухтактной схеме переменная составляющая проходит через половину первичной обмотки трансформатора и затем со средней точки замыкается через источник питания на общий электрод, то в трансформированной схеме переменная составляющая проходит через все нагрузочное сопротивление, не имеющее средней точки, и замыкается на общий электрод через участок коллектор — управляющий электрод второго триода. Для такого направления тока коллектор оказывается включенным в направлении прямого тока, поэтому сопротивление второго триода для полуволны, усиленной первым триодом, невелико.

В такой схеме применяют обычно параллельное питание коллекторов, как это изображено на фиг. 32,*а*. Источник питания включается для каждого из триодов параллельно нагрузке и блокируется по переменной составляющей дросселем.

Описанные в литературе испытания двух двухтактных схем на кристаллических триодах, одна из которых была скопирована со схем вакуумных триодов, а вторая — трансформирована на основании принципа двойственной эквивалентности, показали, что трансформированная схема, якобы, может дать значительно бóльшую мощность на выходе, чем нетрансформированная схема. Тем не менее, практически

используются двухтактные схемы, ничем не отличающиеся от обычных двухтактных схем на вакуумных триодах. Так, на фиг. 32,*б* изображена практическая двухтактная схема усилителя высоких частот, совершенно подобная схемам с вакуумными триодами.



Фиг. 33. Приемник на кристаллических триодах.

В табл. 4 приведено несколько типовых режимов для схем с точечным и слоистым кристаллическими триодами.

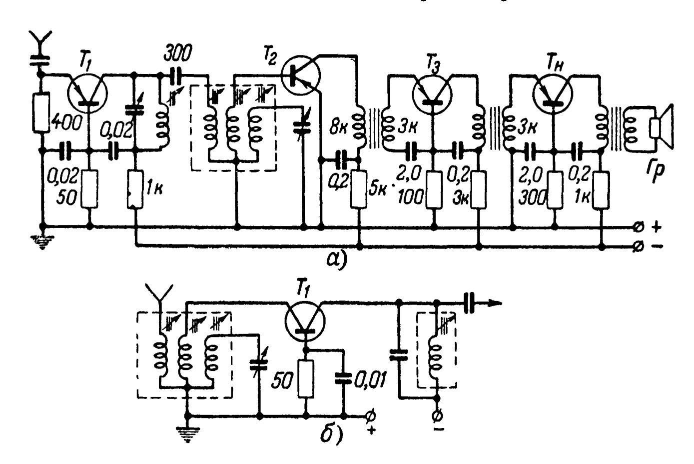
Таблица 4

Вид схемы	Режимы					
	Напряжение источника питания коллектора, *в*	Ток коллектора, *ма*	Мощность, рассеиваемая на коллекторе, *мвт*	Ток эмиттера, *ма*	Среднее усиление по мощности, *дб*	Средняя выходная мощность, *мвт*
Схема с общим управляющим электродом на точечном триоде	50	2	20	1,5	—	—
Схема с общим эмиттером на точечном триоде	5	4	—	1,5	18	4,5
Схема с общим управляющим электродом на слоистом триоде	50	5	50	5	—	—

Рассмотрим три варианта практических схем радиоприемников на кристаллических триодах.

На фиг. 33 показана схема регенеративного приемника с трехкаскадным усилителем низкой частоты на трансформаторах. Напряжение входного сигнала подается на колебательный контур, включенный в цепь управляющего электрода триода T_1. Такое включение контура характерно для

генераторов на точечных кристаллических триодах. Колебательный контур, являясь элементом положительной обратной связи на резонансной частоте, при правильно выбранных параметрах приводит каскад в автоколебательный режим. Режим, необходимый для возникновения устойчивых колебаний, подбирается при помощи переменного сопротивления *R*. Возникающее на выходе регенеративного каскада



Фиг. 34. Приемник на кристаллических триодах с режекторным подавлением соседних каналов.

а — схема с апериодическим входом и одним режектором; *б* — вариант усилителя высокой частоты с режектором, настроенным на подавление второго канала на входе.

напряжение звуковой частоты усиливается трехкаскадным усилителем.

К триодам T_2, T_3 и T_4, работающим в усилителе низкой частоты, предъявляются жесткие требования с точки зрения устойчивости по постоянному току, так как, если пренебречь активным сопротивлением обмоток трансформатора, то все они работают с закороченным по постоянному току эмиттером. У триода T_4 закорочен по постоянному току и коллектор.

На фиг. 34,*а* изображена схема приемника, состоящего из каскада усиления по высокой частоте с апериодическим входом на триоде T_1, детектора-усилителя низкой частоты на триоде T_2 и двух каскадов усиления низкой частоты на триодах T_3 и T_4.

Стремление обеспечить подавление соседнего канала при малом числе контуров заставило использовать на входе де-

тектора режекторный фильтр. Его параллельный контур, индуктивно связанный с входом детектора, настраивается на частоту соседней станции с целью подавления ее сигнала.

Для подавления двух мешающих станций может быть использован вариант усилителя высокой частоты, схема которого приведена на фиг. 34,*б*. Здесь вместо сопротивления на входе усилителя включен второй режекторный контур.

Для схемы фиг. 34 характерно использование цепей автосмещения, позволяющих подобрать наиболее выгодный режим.

Величина сопротивления смещения в усилителе радиочастоты составляет 50 *ом*, в предоконечном усилителе низкой частоты 100 *ом* и в оконечном каскаде 300 *ом*. Оконечный каскад работает в режиме максимальной мощности при максимальном смещении и максимальном отрицательном напряжении на коллекторе.

Детектор-усилитель низкой частоты выполнен по схеме с общим эмиттером. Триод T_2, используемый в этом каскаде, должен обладать высокой устойчивостью по постоянному току, т. е. малой величиной сопротивления внутренней обратной связи r_{12}. Кроме того, то же самое требование вытекает и из необходимости работать с минимальными токами эмиттера на участке верхнего изгиба характеристик усиления (см. фиг. 17,*б*) для детектирования. Правильный выбор напряжения на коллекторе, соответствующего наибольшей крутизне характеристик, обеспечивает максимальное усиление низкочастотных колебаний.

В схеме фиг. 34 в отличие от схемы фиг. 33 применяется последовательное, а не параллельное питание коллекторов.

Следует отметить, что ввиду значительной разницы в величине входных и выходных сопротивлений кристаллических триодов величины разделительных и блокировочных емкостей во входных цепях выбираются приблизительно в 10 раз бóльшими, чем в выходных цепях.

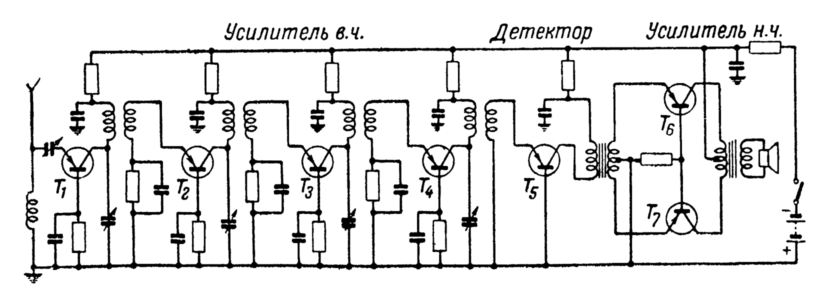
Приемник такого типа обладает невысокой чувствительностью и узким диапазоном и может применяться лишь для приема сравнительно мощных местных станций.

На фиг. 35 показана схема приемника прямого усиления, в котором основное усиление осуществляется по высокой частоте четырехкаскадным усилителем на триодах.

Во всех четырех каскадах применяются параллельные контуры с разделительной емкостью в индуктивной ветви. С целью согласования применяется трансформаторная связь

между каскадами. Контуры перестраиваются по диапазону при помощи конденсаторов переменной емкости. Питание коллекторов последовательное. Все каскады высокой частоты работают с автоматическим смещением. Четырехкаскадный усилитель обеспечивает достаточную избирательность и чувствительность.

Последний каскад усилителя высокой частоты связан через трансформатор с входом детектора-усилителя низкой частоты, так же как и на фиг. 34. Детектор T_5 на схеме фиг. 35 отличается от детектора T_2 на фиг. 34 только тем,



Фиг. 35. Приемник на кристаллических триодах с основным усилением по высокой частоте.

что в нем используется триод, включенный по схеме с общим управляющим электродом. Работа каскада происходит также в области верхнего перегиба характеристики усиления (см. фиг. 17,*б*).

Продетектированные и усиленные колебания низкой частоты через согласующий трансформатор подаются на вход выходного каскада, выполненного по двухтактной схеме на триодах T_6 и T_7. Выходной каскад работает также с автоматическим смещением.

Достоинством схемы фиг. 35 по сравнению с схемой фиг. 34 являются большая чувствительность и большая выходная мощность. Значительным преимуществом является и то, что основное усиление в этой схеме происходит по высокой частоте, чем снижается общий уровень шумов. На высоких частотах шумы значительно ниже, чем на низких частотах, поэтому усиление происходит при более выгодном отношении сигнала к шуму. На входе же низкочастотного тракта сигнал имеет значительный уровень, обеспечивающий необходимое превышение сигнала над низкочастотными шумами. Кроме того, при усилении по высокой частоте уменьшается количество низкочастотных согласующих

трансформаторов, имеющих значительный вес и габариты.

Трансформаторное согласование каскадов высокой частоты конструктивно сложнее, чем автотрансформаторное. Однако его достоинством является то, что в этом случае цепь коллектора одного каскада и цепь эмиттера другого каскада оказываются развязанными по постоянному току. Это устраняет необходимость использования разделительных емкостей, что имело бы место при автотрансформаторном методе согласования.

Следует указать, что в некоторых статьях в качестве отличительной особенности двухтактных схем на кристаллических триодах приводится возможность конструирования схем без выходного трансформатора. Это положение совершенно неправильно. В схеме фиг. 35 на выходе двухтактной схемы на кристаллических триодах применяется выходной трансформатор. Наличие или отсутствие выходного трансформатора в двухтактной схеме определяется не типом триода, а типом нагрузки. Работа на низкоомную нагрузку требует применения согласующего трансформатора как в схемах с вакуумными триодами, так и в схемах с кристаллическими триодами. Если же величина сопротивления нагрузки обеспечивает согласование выхода схемы с нагрузкой, то в том и другом случае можно обойтись без трансформатора.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ИМПУЛЬСНЫЕ СХЕМЫ С КРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ ТРИОДАМИ

С момента появления кристаллических триодов выяснилось, что применение их в импульсных схемах сулит большие выгоды. Особенно удобными для этой цели оказались точечные триоды. В гл. 1 было показано, что точечный триод представляет собой своеобразную двухкаскадную схему, которая охвачена положительной обратной связью, подаваемой с выхода второго каскада на вход первого каскада. Этим объясняется возможность выполнить с одним точечным триодом схему, аналогичную схеме мультивибратора. Неустойчивость некоторых точечных триодов по постоянному току, которая препятствует нормальной работе усилительных схем, очень удобна в импульсных схемах. Неустойчивый в короткозамкнутом состоянии точечный триод представляет собой спусковую схему. Для конструирования такой

же схемы на слоистых триодах понадобилось бы два триода, так же как для выполнения ее на вакуумных лампах.

Импульсные схемы применяются в различных областях техники. Методы их применения и варианты схем могут быть многочисленны. Рассмотрим кратко методы расчета простейших импульсных схем и некоторые практические схемы.

При выводе основных соотношений, характеризующих кристаллический триод, мы исходили из предположений, что рассматриваются малые изменения токов и напряжений. Это позволяло считать характеристики кристаллического триода в пределах данных малых изменений линейными, а величины, характеризующие эквивалентную схему кристаллического триода, неизменными.

Очевидно, что при рассмотрении импульсной работы кристаллического триода придется иметь дело с токами и напряжениями, которые изменяются в довольно широких пределах.

Характеристики кристаллического триода в этом случае считать линейными совершенно невозможно, параметры эквивалентной схемы кристаллического триода при этом будут также изменяться в широких пределах: от очень малых величин, когда их можно практически считать равными нулю, до очень значительных величин. Все эти соображения, помимо импульсных схем, могут быть отнесены также и ко всем другим случаям работы схем при значительных изменениях токов и напряжений.

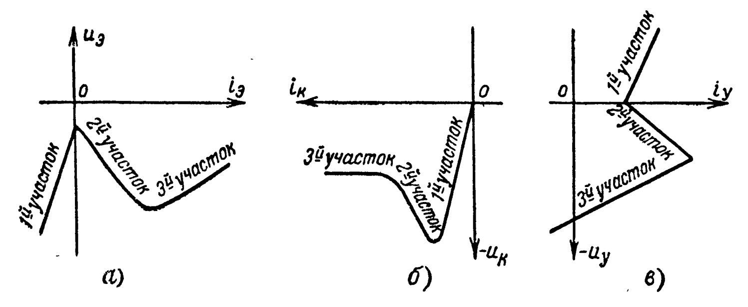
Импульсные схемы с одним и двумя положениями равновесия и автоколебательные импульсные схемы можно исследовать посредством вольтамперных характеристик входа или выхода, снятых экспериментально или рассчитанных аналитически.

Рассматривая формулы (63) и (67), которые определяют величины входного и выходного сопротивлений схемы на кристаллическом триоде, можно придти к выводу, что при соответствующем выборе величин внешних сопротивлений схемы кристаллического триода и в зависимости от изменений собственных параметров кристаллического триода с изменением токов и напряжений может наступить такой момент, когда абсолютная величина второго члена окажется больше абсолютной величины первого, а входное или выходное сопротивление схемы окажется отрицательным, что будет соответствовать падающему участку вольтамперной характеристики входа или выхода.

Схемы, обладающие падающим участком вольтамперной характеристики, могут быть использованы в качестве спусковых схем с одним или двумя положениями равновесия, а также для генерирования импульсов.

14. ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМПУЛЬСНЫХ СХЕМ

Вольтамперные характеристики входа зависят от способа включения кристаллического триода и от того, какой электрод соединен со входом схемы. Рассмотрим три основных варианта: 1) схему с общим управляющим электродом и со входом на эмиттерный электрод, 2) схему с общим управляющим электродом и со входом на коллекторный электрод и 3) схему с общим эмиттером и со входом на управляющий электрод. В зависимости от схемы мы будем говорить о вольтамперных характеристиках эмиттера (первая схема), коллектора (вторая схема) и управляющего электрода (третья схема).



Фиг. 36. Общий вид вольтамперных характеристик входа.
а — эмиттерные; *б* — коллекторные; *в* — управляющего электрода.

На фиг. 36 изображены идеализированные эмиттерные и коллекторные характеристики, а также характеристики управляющего электрода. Иногда такие характеристики называют характеристиками отрицательного сопротивления. Из кривых фиг. 36 видно, что каждая из характеристик может быть разделена на три области, две из которых характеризуются положительным наклоном (возрастание), т. е. положительным сопротивлением, а третья — отрицательным наклоном (падение), т. е. отрицательным сопротивлением для переменного тока. Если пересечь вольтамперную характеристику нагрузочной прямой так, чтобы получить три точки пересечения, то две крайние точки будут устойчивыми

(фиг. 36), а средняя точка будет неустойчивой. Одна из устойчивых точек находится на ветви характеристики с положительным наклоном (возрастающей) и лежит в области малых токов, а для эмиттерных характеристик даже в области отрицательных токов. Этот участок характеристики будем называть первым участком. Участок характеристики с отрицательным наклоном (падающим) будем называть вторым участком, а участок характеристики с положительным наклоном, лежащий в области больших значений токов,— третьим участком характеристики. Параметры кристаллического триода, относящиеся к первому участку характеристики, впредь будем отмечать одним штрихом, а параметры триода, относящиеся к третьему участку,— тремя штрихами. Параметры кристаллического триода, соответствующие второму участку характеристики, будем писать без индекса.

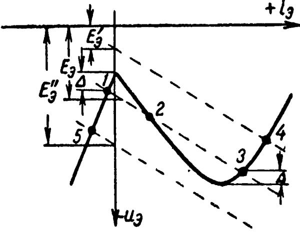
Наклон нагрузочной прямой определяется величиной сопротивления нагрузки, а точка ее пересечения с осью напряжений — величиной э. д. с. источника, включенного в данную цепь.

Рабочая точка будет нормально находиться в одной из устойчивых точек характеристики. Устойчивость или неустойчивость той или иной точки может быть пояснена следующим образом.

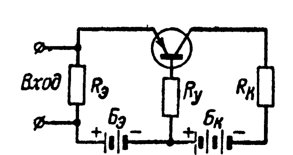
Пусть схема находится в устойчивой точке *1* при установившихся значениях токов и напряжений (фиг. 37). При любых случайных толчках, не выводящих схему за пределы первого участка характеристики, схема будет снова возвращаться в точку *1*. Если величина Δ выбрана достаточно большой, то толчки флюктуационного происхождения не будут выходить за границы первого участка и рабочая точка, вообще говоря, будет совершать непрерывные колебания в небольшой области около точки *1*. То же самое можно сказать и о точке *3*. Практически же мы пренебрегаем этими малыми отклонениями и считаем, что рабочая точка устойчиво находится в точке *1* и способна при отсутствии внешнего воздействия оставаться в ней сколь угодно долгое время. Действительно, в точках *1* и *3* небольшие изменения напряжения на эмиттере в сторону увеличения его абсолютной величины приводят к уменьшению тока эмиттера (и наоборот). Это приводит к уменьшению тока коллектора и тока управляющего электрода, вследствие чего уменьшается падение напряжения на сопротивлении управляющего электрода и соответственно с этим величина отрицательного на-

пряжения на эмиттере. Рабочая точка возвращается в исходное положение.

Совсем по-другому будет вести себя рабочая точка в точке 2, находящейся на падающем участке характеристики. При увеличении отрицательного напряжения на эмиттере ток эмиттера увеличивается (и наоборот). Это приводит к еще большему увеличению отрицательного напряжения на эмиттере, что в свою очередь увеличивает ток эмиттера. Поэтому любой случайный сколь угодно малый толчок приводит к лавинообразному процессу нарастания или уменьшения тока, выводящему рабочую точку за пределы падающего (второго) участка характеристики. Попадая на первый или третий участок характеристики, рабочая точка фиксируется в соответствующем устойчивом месте.



Фиг. 37. Характеристики схемы с двумя положениями равновесия со входом на эмиттер.



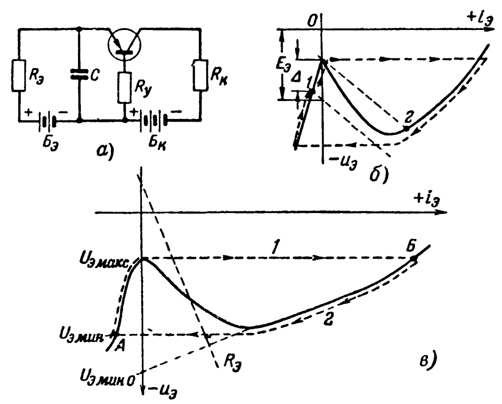
Фиг. 38. Схема с двумя положениями равновесия со входом на эмиттер.

Рассмотрим на примере эмиттерных характеристик, изображенных на фиг. 37, принцип работы схемы с двумя положениями равновесия. Схема с данными характеристиками показана на фиг. 38.

Пусть схема нормально находится в устойчивом положении с рабочей точкой в точке *1*. Это соответствует э. д. с. $E_э$ источника смещения в цепи эмиттера. Если на вход схемы подать импульс такой полярности, что суммарное напряжение э. д. с. источника смещения и напряжения импульса на сопротивлении $R_э$ станет равным величине $E_э'$, то нагрузочная прямая сдвинется в верхнее положение, а рабочая точка перейдет в точку *4*. После окончания действия импульса нагрузочная прямая займет свое прежнее положение и рабочая точка перейдет в точку *3*. Таким образом осуществляется перебрасывание из точки, соответствующей малым токам, в точку, соответствующую большим токам. Для обратного перебрасывания схемы на ее вход не-

обходимо подать импульс напряжения обратной полярности и такой амплитуды, чтобы сместить нагрузочную прямую в нижнее положение на фиг. 37. Тогда рабочая точка переместится в точку *5*, а после окончания импульса вернется обратно в точку *1*. Аналогично происходит работа и в схемах со входом на коллектор или на управляющий электрод.

Для того чтобы получить схему с одним положением равновесия или автоколебательную импульсную схему, в схему фиг. 38 необходимо включить конденсатор так, как это изображено на фиг. 39,*а*. Будет ли схема работать с одним положением равновесия (фиг. 39,*б*) или в автоколебательном режиме (фиг. 39,*в*), определится выбором сопротивле-



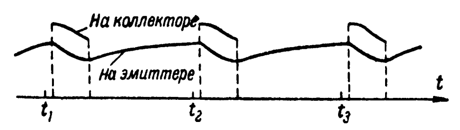
Фиг. 39. Схема, работающая с одним положением равновесия или в автоколебательном режиме и соответствующие характеристики.

а — схема; *б* — характеристики для случая одного положения равновесия; *в* — характеристики для случая автоколебательного режима.

кия $R_э$ и величины э. д. с. источника смещения. При работе в автоколебательном режиме емкость C заряжается в интервале между импульсами через сопротивление $R_э$. Как только напряжение на емкости достигнет значения $U_{э.\ макс}$, триод отпирается. Ток эмиттера и ток коллектора нарастают лавинообразно до тех пор, пока триод не перейдет в режим насыщения, соответствующий третьему участку вольтамперной характеристики. После этого емкость C разряжается через входное сопротивление отпертого триода, имеющее малую величину. Как только напряжение на емкости достигает величины $U_{э.\ мин}$, начинается лавинообразный

процесс уменьшения тока эмиттера и тока коллектора. Триод запирается и начинается заряд емкости C от $U_{э.\,мин}$ до $U_{э.\,макс}$, соответствующий интервалу между импульсами.

При работе с одним положением равновесия сопротивление $R_э$ э. д. с. $E_э$ выбираются так, чтобы напряжение на емкости не достигало $U_{э.макс}$. В этом случае отпирание триода происходит при подаче на вход схемы импульса такой амплитуды, чтобы суммарное напряжение на эмиттере превысило напряжение $U_{э.\,макс}$. Процесс формирования импульса происходит аналогично предыдущему случаю. Поэтому форма импульсов тока и напряжения для того и другого случаев будет совершенно одинакова (фиг. 40). Различие будет состоять лишь в том, что частота следования импульсов для схемы с одним положением равновесия будет определяться частотой следования запускающих импульсов, а для схемы, работающей в автоколебательном режиме, частота следования импульсов определится постоянной времени цепи эмиттера. Моменты времени t_1 и t_2 соответствуют моментам прихода запускающих импульсов. Задержка импульса тока эмиттера относительно запускающего импульса в схемах с кристаллическими триодами не превосходит 0,1 *мксек*. Схемы, аналогичные изображенной на фиг. 39,*а*, позволяют довольно легко получать импульсы с длительностью фронта порядка 0,1 *мксек*. Оказывается возможным также получение и более крутых фронтов с длительностью до 0,02 *мксек*. Длительность среза импульсов обычно в 3—4 раза больше длительности фронта.



Фиг. 40. Осциллограммы напряжений в цепи эмиттера и в цепи коллектора при работе схемы с одним положением равновесия или в автоколебательном режиме.

Пилу напряжения можно использовать для развертки. Для улучшения линейности могут быть использованы все обычные методы (увеличение напряжений и зарядных сопротивлений).

Первая схема пригодна для использования ее в ждущих развертках, вторая схема может быть использована для непрерывной развертки.

Используя соответствующие вольтамперные характеристики, можно построить все три варианта схем со входом на коллектор или управляющий электрод. Анализ этих схем

тоже в основном не отличается от анализа схем со входом на эмиттер. Для анализа схем необходимо иметь аналитическое выражение вольтамперных характеристик входа.

15. АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВХОДА

Вольтамперные характеристики входа представляют собой нелинейную зависимость токов от напряжений на входе, выразить которую аналитически, пользуясь реальными характеристиками кристаллических триодов, было бы трудно.

Сравнительно просто можно получить идеализированные характеристики входа при помощи идеализированных линейно-ломаных характеристик кристаллического триода. В пределах каждого отрезка таких характеристик зависимость напряжений от токов будет линейной и каждому отрезку характеристик будут соответствовать свои вполне определенные значения параметров эквивалентной схемы кристаллического триода.

Сравнивая вольтамперные характеристики входа с идеализированными характеристиками кристаллического триода, можно заметить, что каждому из участков вольтамперной характеристики будут соответствовать некоторые определенные параметры кристаллического триода. Таким образом, реальная характеристика входа может быть также заменена идеализированной характеристикой, представляющей собой три отрезка прямой линии, соответствующих трем участкам характеристики.

Для аналитического выражения характеристики воспользуемся теми линейными соотношениями, которые были выведены для случая малых изменений токов и напряжений, и выведем выражение, определяющее напряжение на входе в функции от тока:

$$u_{вх} = ki_{вх} + a \cdot E.$$

Нелинейность этой формулы скрывается в коэффициентах k и a, которые определяются как параметрами элементов внешней цепи, так и параметрами кристаллического триода, а параметры кристаллического триода зависят от тока. Пользуясь идеализированными статическими характеристиками, можно получить три различных варианта постоянных параметров кристаллического триода, соответствующих трем участкам вольтамперной характеристики входа. Подставляя в уравнение характеристики входа различные

значения параметров кристаллического триода, получим три уравнения, каждое из которых является уравнением прямой и выражает собой один из участков вольтамперной характеристики входа.

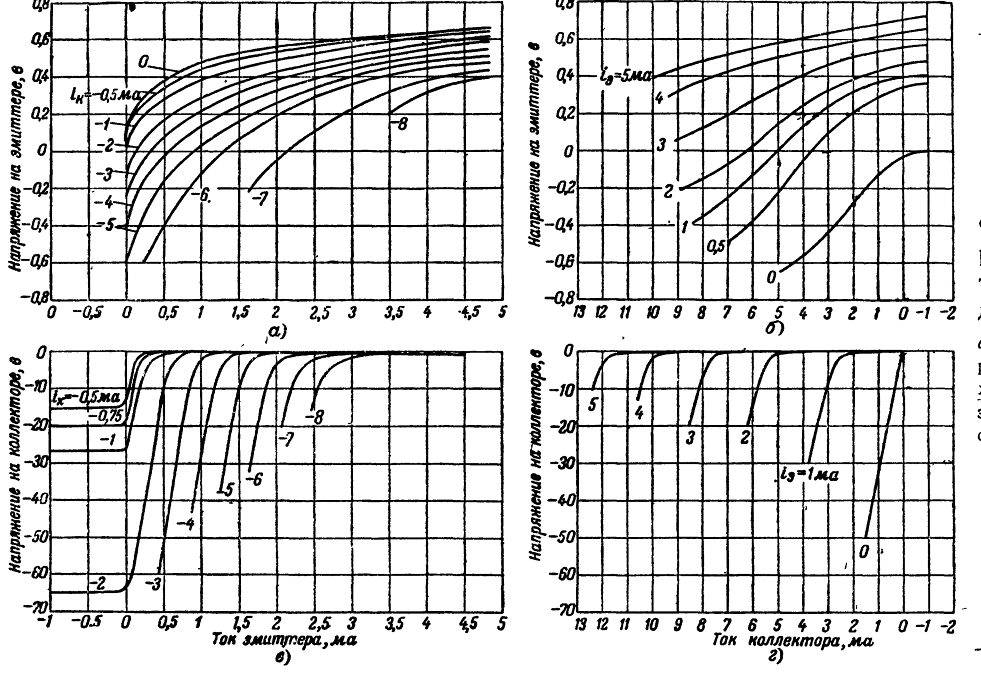
Рассмотрим на конкретном примере идеализацию характеристик кристаллического триода и проведем расчет вольтамперной характеристики схемы с общим управляющим электродом и входом на эмиттер.

На фиг. 41 приведены характеристики одного из образцов кристаллических триодов, предназначенного для работы в спусковых схемах. Тангенс угла наклона характеристик определяет собой величины параметров четырехполюсника, связанные с параметрами Т-образной эквивалентной схемы кристаллического триода выражениями (3)—(6).

Рассмотрим вначале, каким образом можно наиболее рационально произвести линеаризацию характеристик входа (фиг. 41,*а*) и характеристик обратной связи (фиг. 41,*б*). Как видно из характеристик обратной связи, сопротивление $r_{12} = r_y$ на всем протяжении хода кривых изменяется довольно слабо, тогда как сопротивление $r_{11} = r_э + r_y$ претерпевает значительные изменения. Учитывая также, что в цепь управляющего электрода включается внешнее сопротивление R_y, величина которого во много раз превосходит величину сопротивления r_y, будем считать сопротивление r_{12} постоянным на всех трех участках вольтамперной характеристики входа. Изменение же сопротивления r_{11} отнесем полностью за счет изменения сопротивления $r_э$.

Итак, характеристики обратной связи апроксимируем в виде прямых и считаем величину сопротивления $r_{12} = r_y$ неизменной для всех трех участков. Входные характеристики следует заменить отрезками прямой, каждый из которых соответствовал бы одному из участков вольтамперной характеристики входа, т. е. характеристики необходимо разбить на три области, соответствующие участкам вольтамперной характеристики входа.

Особенно наглядно такое разделение на области можно произвести на характеристиках усиления. Очевидно, что резкие изменения в ходе вольтамперных характеристик входа должны быть каким-то образом связаны с ходом статических характеристик кристаллического триода и, в частности, с ходом характеристик усиления. Рассматривая каждую из кривых характеристик усиления, мы видим, что она



Фиг. 41. Статические характеристики точечного триода, предназначенного для импульсной работы.

а — семейство входных характеристик; *б* — семейство характеристик обратной связи; *в* — семейство характеристик усиления; *г* — семейство выходных характеристик.

состоит из трех явно выраженных участков (фиг. 41,*в*). В средней части характеристики имеют наибольший наклон, что соответствует максимальному усилению. Левая часть характеристик, находящаяся в области отрицательных значений тока эмиттера, имеет тангенс угла наклона, почти равный нулю. Эта область может быть названа областью насыщения напряжения коллектора. Правая часть характеристик имеет также нулевой наклон и соответствует нулевому напряжению на коллекторе. Ток эмиттера, при котором происходит резкое изменение крутизны характеристик, может быть приблизительно определен из следующих уравнений:

$$U_к = r_{21} \cdot i_э + r_{22} \cdot i_к,$$

так как $r_{21} = \alpha \cdot r_{22}$,

$$U_к = r_{22} (\alpha \cdot i_э + i_к),$$

$$U_к = 0$$

при

$$i_э = -\frac{i_к}{\alpha}. \quad (81)$$

Таким образом, характеристики разбиты на три области, первая из которых определяется токами эмиттера меньше нуля и соответствует первому участку вольтамперных характеристик входа, вторая, характеризующаяся максимальным усилением, соответствует падающему (второму) участку, и третья область, характеризующаяся токами эмиттера $i_э > -\frac{i_к}{\alpha}$, соответствует третьему участку вольтамперных характеристик входа. На такие же области по величинам токов эмиттера следует разбить и входные характеристики (фиг. 41,*а*).

Получив из линеаризированных характеристик обратной связи величину сопротивления $r_у$ и из линеаризированных входных характеристик величину сопротивления r_{11} для каждой из трех областей, легко вычислить для каждой из трех областей величину сопротивления $r_э$.

Разбивку на области и линеаризацию характеристик усиления мы уже рассмотрели. Определяя величины сопротивлений r_{21} для каждой из областей, на основании выражения (6) можно сделать заключение, что так как r_{21} не может быть меньше $r_у$, то в первой области следует считать $r_в = 0$, а $r_{21} = r_у$, во второй области, где $r_{21} \gg r_у$, счи-

таем $r_{21} \approx r_в$. В третьей области величина $r_в$ хотя и мала, но может быть учтена при расчетах.

Характеристики выхода могут быть линеаризированы таким же образом. Сопротивление r_{22} в пределах характеристик выхода имеет в основном две величины: значительную, соответствующую токам коллектора $i_к > -\alpha \cdot i_э$, и малую при $i_к < -\alpha \cdot i_э$. Большая величина соответствует первой и второй областям, а малая величина — третьей области.

Для удобства расчетов перенесем оси координат так, как это показано на фиг. 42. С учетом переноса координатных осей уравнение характеристик может быть записано следующим образом:

$$u_к - U_{к0} = r_{21} \cdot i_э + r_{22} (i_к - I_{к0}).$$

Считая, что $U_{к0} = I_{к0} \cdot r_{22}'''$ и переходя от параметров четырехполюсника к параметрам триода, получим следующее выражение для характеристик:

$$u_к + I_{к0} (r_к - r_к''') = r_{21} \cdot i_э + r_{22} \cdot i_к. \qquad (82)$$

Из выражения (82) видно, что перенос осей выходных характеристик может быть учтен включением в эквивалентную схему кристаллического триода генератора постоянной э. д. с.

$$E = I_{к0} (r_к - r_к'''). \qquad (83)$$

Согласно ранее принятым обозначениям под сопротивлениями $r_к$ и $r_к'''$ понимаем соответствующие сопротивления, вычисленные для первого и третьего участков.

Эквивалентная схема в этом случае примет вид, изображенный на фиг. 43; ей будут соответствовать следующие уравнения:

$$u_э = (r_э + r_у) \cdot i_э + r_у \cdot i_к; \qquad (84)$$

$$u_к + I_{к0} (r_к' - r_к''') = (r_в + r_у) \cdot i_э + (r_к + r_у) \cdot i_к. \qquad (85)$$

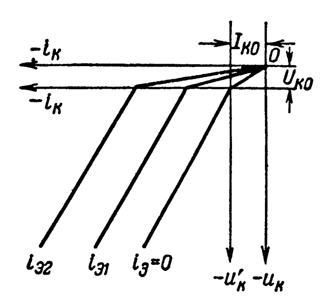
Для того чтобы получить уравнение вольтамперной характеристики входа, следует решить уравнения (84) и (85) относительно напряжения на эмиттере в зависи-

мости от тока эмиттера. В общем случае следует учесть также источники питания и смещения и сопротивления внешних цепей:

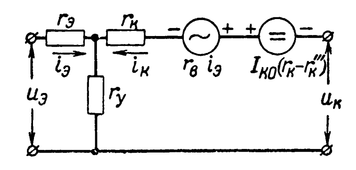
$$u_э = E_э - i_э \cdot R_э; \tag{86}$$

$$u_к = E_к - i_к \cdot R_к. \tag{87}$$

Решая уравнения (84)—(87) относительно напряжения на эмиттере и учитывая возможность включения в цепь управляющего электрода внешнего сопротивления $R_у$, суммирующегося с сопротивлением $r_у$, получим урав-



Фиг. 42. Идеализация семейства выходных характеристик и перенос осей.



Фиг. 43. Эквивалентная схема триода с учетом переноса осей включением эквивалентного генератора постоянной э. д. с.

нение вольтамперной характеристики входа для схемы с общим управляющим электродом и входом на эмиттер в общем виде:

$$u_э = E_э - i_э \cdot R_э = \left[r_э + r_у + R_у - \frac{(r_у + R_у)\,(r_у + R_у + r_в)}{r_у + R_у + r_к + R_к} \right] \cdot i_э + $$

$$+ \frac{\left[E_к + I_{к0}\left(r_к - r_к'''\right)\right]}{r_у + R_у + r_к + R_к} \cdot (r_у + R_у). \tag{88}$$

Это уравнение, вообще говоря, нелинейное, так как параметры кристаллического триода $r_э$; $r_у$; $r_к$ и $r_в$ зависят от токов. Однако на основании линеаризированных статических характеристик можно получить значения параметров кристаллического триода, подставляя которые в уравнение (88), получим уравнения для каждого из трех участков вольтамперной характеристики входа.

При расчете вольтамперных характеристик входа большое значение имеет определение переходных точек характеристики: точки максимума и точки минимума. Знание координат этих точек необходимо как для расчета

амплитуды импульса запуска, так и для проверочного расчета возможности ложного запуска схемы случайным изменением тока или напряжения. Точки эти определяются как точки пересечения характеристик первого и второго участков и второго и третьего участков. Аналитический расчет производится совместным решением уравнений для двух смежных участков.

Для схемы с общим управляющим электродом и со входом на коллектор уравнение вольтамперной характеристики входа имеет такой вид:

$$u_к = E_к + I_{к0}(r_к - r_к''') = i_к \Big[r_к + R_к + r_у + R_у - \\ - \frac{(r_у + R_у)(r_у + R_у + r_в)}{r_э + R_э + r_у + R_у}\Big] + \frac{E_э(r_у + R_у + r_в)}{r_э + R_э + r_у + R_у}. \quad (89)$$

Подставляя в это уравнение значения параметров кристаллического триода для каждого из участков аналогично предыдущему примеру, получим уравнения участков вольтамперной характеристики при входе на коллектор.

Для схемы с общим эмиттером и со входом на управляющий электрод уравнение вольтамперной характеристики входа имеет вид:

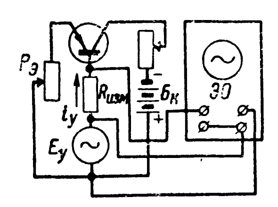
$$u_у = i_у \left[r_у + R_э + r_э - \frac{(r_э + R_э)(r_э + R_э - r_в)}{r_э + R_э + r_к + R_к - r_в}\right] + \\ + \frac{[E_к + I_{к0}(r_к - r_к''')](r_э + R_э)}{r_э + R_э + r_к + R_к - r_в}. \quad (90)$$

Характеристики, рассчитанные таким образом, дают хорошее совпадение с вольтамперными характеристиками входа, снятыми экспериментально.

На фиг. 44 изображена схема снятия вольтамперных характеристик входа для схемы со входом на управляющий электрод. В цепь управляющего электрода последовательно с генератором переменной э. д. с. включено измерительное сопротивление $R_{изм}$. Напряжение генератора переменной э. д. с. и напряжение с измерительного сопротивления, пропорциональное току управляющего электрода, подаются на отклоняющие пластины электронного осциллографа *ЭО*, на экране которого можно наблюдать вид характеристик отрицательного сопротивления в цепи управляющего электрода. Если произвести расчет масштаба и определить положение осей, то полученная на экране осциллографа вольтамперная

характеристика может быть использована для анализа схемы, для сравнения реальной характеристики с аналитической и для правильного выбора нагрузочного сопротивления.

Выше были рассмотрены три самые простые схемы пусковых устройств. Совершенно очевидно, что в зависимости от назначения и требований, предъявляемых к схемам, может быть сконструировано большое количество самых разнообразных вариантов схем. Рассмотренный выше метод анализа может быть применен ко всем вариантам схем с падающим участком вольтамперной характеристики.



Фиг. 44. Схема снятия вольтамперных характеристик входа при помощи осциллографа.

В заключение следует привести расчетные формулы для длительности импульса и длительности промежутка между импульсами:

$$T_И = \frac{1}{\beta'} \ln \frac{u_{э.\,мин}(R_э + R'_{вх}) - (u_{э.\,макс} \cdot R_э + E_э \cdot R'_{вх})}{u_{э.\,макс}(R_э + R'_{вх}) - (u_{э.\,макс} \cdot R_э + E_э \cdot R'_{вх})}; \qquad (91)$$

$$t_И = \frac{1}{\beta'''} \ln \frac{u_{э.\,макс}(R_э + R'''_{вх}) - (u_{э.\,мин\,0} \cdot R_э + E_э \cdot R'''_{вх})}{u_{э.\,мин}(R_э + R'''_{вх}) - (u_{э.\,мин\,0} \cdot R_э + E_э \cdot R'''_{вх})}, \qquad (92)$$

где

$$\beta' = \frac{R_э + R'_{вх}}{R_э \cdot R'_{вх} \cdot C}; \quad \beta''' = \frac{R_э + R'''_{вх}}{R_э \cdot R'''_{вх} \cdot C};$$

$T_И$ — интервал между импульсами;

$t_И$ — длительность импульса;

C — емкость в цепи эмиттера.

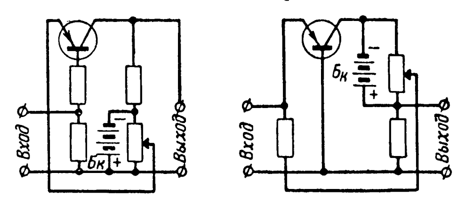
Полный период колебаний определится суммой интервала между импульсами и длительности импульса.

16. НЕКОТОРЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ ИМПУЛЬСНЫЕ СХЕМЫ

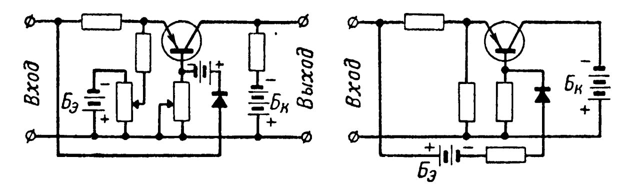
На фиг. 45 изображены две простейшие практические схемы с двумя положениями равновесия. Существенным недостатком такого рода схем является необходимость подачи для их запуска импульсов переменной полярности.

На фиг. 46 приведены две схемы спусковых генераторов, возбуждаемых однополярными импульсами. Возможность запуска схем однополярными импульсами достигается включением в схему коммутирующего диода.

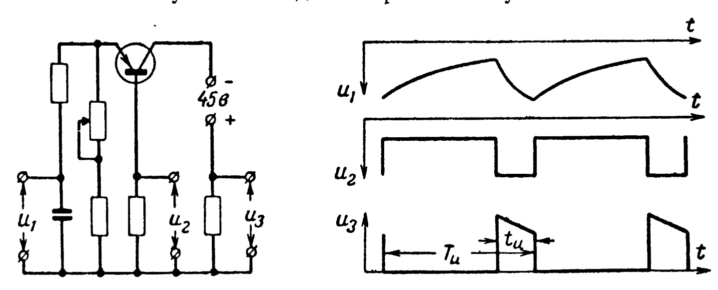
На фиг. 47 показана схема импульсного генератора. Там же приводятся временные диаграммы импульсов, снимаемых с различных элементов схемы. Данная схема генерирует импульсы с частотой повторения около 10 *кгц*. Для



Фиг. 45. Схемы с двумя положениями равновесия, запускаемые разнополярными импульсами.



Фиг. 46. Схемы с двумя положениями равновесия, запускаемые однополярными импульсами.



Фиг. 47. Схема импульсного генератора и эпюры напряжений в различных точках схемы.

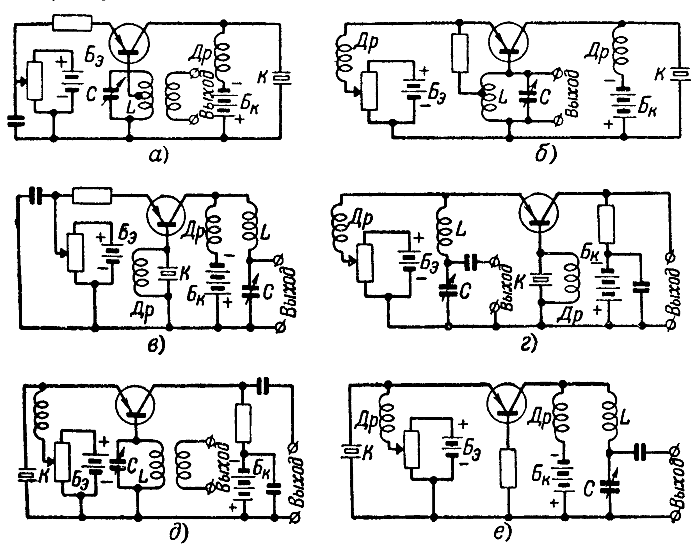
того чтобы фронты импульсов при этом были достаточно крутыми, кристаллический триод должен иметь граничную частоту не ниже 100 *кгц*.

17. АВТОГЕНЕРАТОРЫ

Так же как и импульсные схемы, автогенераторы работают в нелинейном режиме. Различие в работе импульсных схем и автогенераторов заключается в том, что в основе работы импульсных схем лежит неустойчивость схемы по

постоянному току, тогда как автогенератор по постоянному току должен быть устойчив. Частота генерирования будет определяться резонансными элементами схемы.

На фиг. 48 приводится шесть генераторных схем. В пяти из них (*а*, *б*, *в*, *г* и *д*) колебательный контур или кварц *К* включаются в цепь общего электрода, создавая значительную обратную связь на резонансной частоте. По постоянному току элемент дополнительной обратной связи не включается (кварц по постоянному току шунтируется дросселем).



Фиг. 48. Варианты схем автогенераторов синусоидальных колебаний.

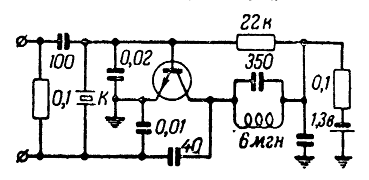
Сильная частотно-зависимая положительная обратная связь приводит схему к возбуждению, если режим по постоянному току выбран так, что рабочая точка находится на падающем участке характеристики.

Можно обеспечить обратную связь и при помощи активного сопротивления, однако в этом случае параметры схемы должны выбираться таким образом, чтобы обеспечить устойчивость по постоянному току. Полярность источника смещения в этом случае меняется на обратную, для того чтобы компенсировать значительное смещение за счет падения напряжения, создаваемого постоянной составляющей тока на сопротивлении смещения.

Такие схемы автогенераторов могут работать только на

точечных триодах в силу их специфических особенностей. Кроме того, на точечных триодах можно собирать и обычные генераторные схемы, применяемые в генераторах на вакуумных триодах.

Автогенераторы на слоистых триодах конструируются так же, как и обычные триодные генераторные схемы. Так как слоистые триоды особенно удобны для работы с малыми напряжениями источников питания, то с ними можно создать исключительно малогабаритные, маломощные генераторы. На фиг. 49 приводится схема такого генератора, используемого в качестве эталона частоты. В схеме работает один слоистый триод типа n-p-n, питаемый от источника с напряжением 1,3 *в*. Потребляемый ток составляет всего 100 *мка*. Генератор работает на частоте 100 *кгц* при среднесуточном уходе частоты $\frac{\Delta f}{f} = 3 \cdot 10^{-9}$. На выходе на настроенной нагрузке развивается колебательное напряжение 0,8 *в*. Схема работает с кварцем, помещенным в эвакуированный баллон. Температурный коэффициент схемы составляет около 10^{-8} (на 1° С).



Фиг. 49. Схема маломощного высокостабильного генератора на кристаллическом триоде.

По диапазону генерируемых частот слоистые триоды уступают точечным. Для точечных триодов в настоящее время достигнуты частоты генерирования в 200—250 *мггц*, тогда как частоты генерирования слоистых триодов ограничиваются 10—20 *мггц*.

Следует заметить, что для точечных триодов граничные частоты генерирования всегда выше граничных частот усиления. Это объясняется тем, что с улучшением частотных свойств увеличивается собственная обратная связь точечного триода, что делает триод неустойчивым и непригодным для усиления.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ТЕХНИКИ

18. ТЕХНОЛОГИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТРИОДОВ

Производство кристаллических триодов, особенно триодов слоистых, в основном сводится к производству полупроводниковых кристаллов с проводимостью одного ка-

кого-либо типа для точечных кристаллических триодов и кристаллов, тип и величина проводимости которых меняются слоями для слоистых кристаллических триодов.

Наиболее широко применяемым в кристаллических триодах полупроводником является германий, хотя не исключается возможность эффективного применения и других полупроводников. Для кристаллических триодов с точечными контактами наиболее широко применяется германий с электронной проводимостью, хотя в последнее время ряд положительных свойств германия с дырочной проводимостью завоевывает ему все более прочное место в технике кристаллических триодов.

Германий является элементом, довольно широко распространенным в природе. Следы германия могут быть обнаружены почти в каждом минерале. Особенно богаты германием бывают цинковые руды и каменный уголь, поэтому весьма перспективным оказывается получение германия из отходов производства цинка и переработки каменного угля.

Однако не всякие германиевые кристаллы могут быть с успехом использованы в кристаллических триодах. Для этого необходимы монокристаллы, однородные кристаллы с допустимыми нарушениями однородности кристаллической решетки. Для получения таких кристаллов приходится прибегать к ряду методов специальной обработки, например к вытягиванию стержня из расплавленного германия. Большое значение при этом имеют скорость вытягивания и режим остывания стержня.

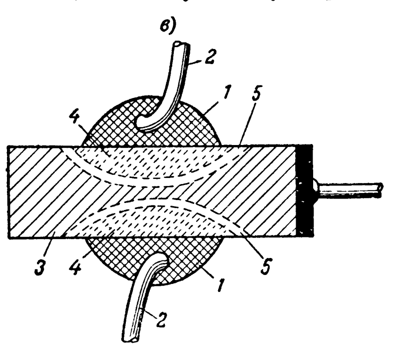
Значительную сложность представляет получение кристаллов, не однородных по типу проводимости, т. е. кристаллов p-n. Такие кристаллы могут быть также получены вытягиванием. Подбирая скорость вытягивания и режим остывания и регулируя концентрацию примесей в сплаве, можно добиться того, что примеси, обусловливающие проводимость разных типов, будут при остывании германия концентрироваться в разных частях объема.

Имеется ряд методов получения переходов типа p-n изменением типа проводимости в части монокристалла. Так, например, если подвергнуть специальной обработке половину кристалла германия с проводимостью типа n и превратить ее проводимость в проводимость типа p, то в таком кристалле получится переход типа p-n.

Превращение одного типа проводимости в другой может быть осуществлено следующими методами: диффузионным введением примесей без термообработки; диффузионным

введением примесей с термообработкой или электрообработкой; бомбардировкой частицами.

Обработка кристалла может быть произведена, как было указано, диффузионным введением примесей. В этом случае на поверхность германиевого кристалла электрически или распылением наносится слой соответствующей примеси, которая диффундирует внутрь кристалла без дополнительной термообработки. Процесс идет довольно медленно, поэтому для ускорения процесса диффузии примеси прибегают к ускоряющей термообработке, электролитическому травлению и электрообработке. Электрообработка, или, как часто называют, формовка, является сама по себе исключительно интересным и важным процессом, поэтому ниже она будет рассмотрена более подробно.



Фиг. 50. Схематический разрез слоистого триода.

1 — присадочный металл; *2* — выводы электродов; *3* — германий типа p; *4* — германий типа n; *5* — переходные нейтральные области.

Если речь идет о приготовлении кристалла для слоистого кристаллического триода, то задача сводится к изготовлению кристалла одного типа проводимости, разделенного на две половины тонким слоем другого типа проводимости. После того как такой кристалл получен и площадь его поперечного сечения удовлетворяет требованиям, процесс изготовления кристаллического триода сводится дальше лишь к укреплению на кристалле выводов электродов.

Самым распространенным в настоящее время способом производства слоистых триодов является способ термодиффузионного введения примесей в германиевый кристалл (сплавление).

Суть технологического процесса заключается в следующем. На тонкую пластинку германия одного типа (например, типа p) с обеих сторон наносится некоторое количество металла, создающего в германии противоположный тип проводимости. Затем кристалл подвергают термообработке. Атомы металла при этом диффундируют в германий и нейтрализуют действие акцепторных примесей.

В процессе дальнейшей диффузии донаторные примеси

становятся преобладающими и у поверхности кристалл начинает менять тип проводимости. Несколько глубже будет нейтральная зона, куда проникло меньшее количество атомов донатора, еще глубже—зона неизменной проводимости.

Так как процесс диффузии идет с обеих сторон пластинки, то зона неизменной проводимости, заключенная между двумя нейтральными зонами, становится все тоньше и тоньше (фиг. 50).

Подбирая толщину пластинки германия, примесный металл и режим термообработки, добиваются получения необходимой толщины зоны неизменной проводимости. Таким образом, получаем кристалл, в котором слоями чередуются: зона одного типа проводимости, нейтральная зона, средняя зона другого типа проводимости, вторая нейтральная зона и вторая крайняя зона того же типа проводимости, что и первая.

При изготовлении кристаллического триода с точечными контактами после получения кристалла нужного типа проводимости и обладающего необходимой величиной удельной проводимости германиевая пластина подвергается полировке и травлению перекисью водорода или еще какого-либо окисляющего средства. Отшлифованная и протравленная пластина режется на небольшие квадратики размером примерно 2×2 *мм²*, которые используются в кристаллических триодах.

Важное значение имеет выбор материала, из которого изготовляются контактные пружинки. В результате большой экспериментальной работы было выяснено, что в паре с германием с электронной проводимостью оказывается выгоднее всего применять контактные пружинки, изготовленные из фосфористой бронзы. Применение фосфористой бронзы облегчает процесс формовки.

Исключительно сложной задачей, которую следует разрешить при производстве кристаллических триодов, является сокращение до минимума разброса параметров. Разброс параметров кристаллических триодов является результатом многих факторов, первым и серьезным из которых оказывается неоднородность кристалла по объему. В значительной степени влияют также на разброс параметров такие факторы, как различная обработка поверхности кристалла, различие в расстоянии между контактными точками, различие в давлении контактных пружин на кристалл.

Собранный кристаллический триод проходит последний вид обработки, электрическую обработку или формовку.

Методы и задачи формовки бывают различными, однако во всех случаях формовка преследует одну цель — улучшение свойств кристаллического триода. Основной принцип формовки заключается в пропускании кратковременных импульсов тока значительной амплитуды через коллекторный контакт. Подбирая амплитуду, длительность импульсов тока и их число, а также правильно выбирая материал контактной пружинки, можно в значительной степени уменьшить разброс параметров кристаллических триодов при их серийном производстве. Применением формовки удается довести коэффициент статического усиления по току в кристаллических триодах до пяти и более и в значительной мере улучшать форму характеристик кристаллического триода, уничтожая на ней падающий участок.

Особенно важное значение имеет формовка с целью получения высоких значений α при изготовлении кристаллических триодов, предназначенных для работы в спусковых схемах и в схемах импульсных генераторов, для нормальной работы которых это является обязательным условием.

Правильный выбор материала пружинки в значительной мере определяет успех формовки, так как в процессе формовки осуществляется диффузия атомов донаторов или акцепторов из материала пружинки в материал полупроводника.

Как уже было сказано, германий типа n и германий типа p не являются единственно применимыми для изготовления кристаллических триодов полупроводниками. В настоящее время известен целый ряд полупроводников, пригодных для изготовления кристаллических триодов. Кроме кремния и германия в эту группу входит до 40 различных полупроводниковых материалов, к числу которых относятся окислы и сульфиды самых разнообразных металлов.

Произведенные исследования показывают, что некоторые из полупроводников имеют более высокие качества, чем германий.

19. ФИЛДИСТОРЫ И КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ТЕТРОДЫ

Кроме описанных выше двух основных типов полупроводниковых усилительных элементов — точечных кристаллических триодов и слоистых триодов, — в настоящее время имеются некоторые отличные от них полупроводниковые усилительные устройства, так называемые филдисторы и кристаллические тетроды.

Филдисторы в своем первоначальном варианте мало чем отличались по внешне-конструктивному выполнению от кристаллических триодов точечно-контактного типа, но в их принципе работы имелось существенное различие. Пружинка эмиттерного контакта не касалась в филдисторе германиевого кристалла, а помещалась на некотором расстоянии от кристалла. Зазор между концом контактной пружинки и поверхностью германиевого кристалла должен составлять при этом величину порядка 1 *мкн*. В этом случае дырочная эмиссия в германий типа *n* создавалась за счет сильного поля. Такие устройства имели входное сопротивление порядка 10 *мгом* и усиление по току порядка 10 000—100 000. Несмотря на высокий коэффициент усиления по току, усиление по напряжению у филдисторов имеет величину, меньшую единицы. Филдистор обладает приблизительно такими же шумовыми характеристиками, как и кристаллический триод точечного типа и имеет значительно бо́льшую емкость входа. По своим усилительным свойствам филдистор скорее может быть назван трансформатором сопротивлений. Филдисторы такого типа довольно сложны в изготовлении, так как очень трудно создать пленку толщиной в 1 *мкн*, не пробиваемую при высоких напряженностях электростатических полей в зазоре.

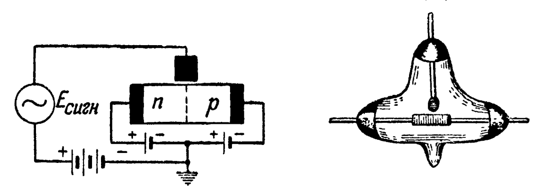
Другой вариант филдистора строится на базе слоистого перехода типа p-n. Над переходной областью кристалла типа p-n на расстоянии нескольких микрон от поверхности кристалла укрепляется широкий электрод (ширина электрода около 100 *мкн*), обеспечивающий эмиссию носителей заряда за счет сильного электрического поля. Такой вариант филдистора подобен предыдущему с той лишь разницей, что точечный контакт коллектора в предыдущем варианте заменен переходом типа p-n. Схематическое изображение и внешний вид такого филдистора, помещенного в жидкий диэлектрик, приведены на фиг. 51.

Жидкий диэлектрик (обычно безводное масло) снижает возможность пробоя и улучшает управляемость филдистора в ε раз. С другой стороны, отрицательное действие диэлектрического заполнения сказывается в резком снижении граничной частоты усиления с сотен килогерц до звуковых частот. Входное сопротивление такого филдистора составляет также около 10 *мгом*, выходное сопротивление порядка нескольких тысяч ом и коэффициент шумов около 70 *дб*.

Другим оригинальным полупроводниковым усилитель-

ным устройством явились кристаллические тетроды. Подобно тому, как в процессе развития техники электровакуумных приборов в электронную лампу для улучшения ее качества или для выполнения ею каких-либо новых функций вводились все новые и новые электроды, так и на основе кристаллического диода был создан сначала кристаллический триод, а затем и тетрод.

Первый вариант кристаллического тетрода был конструктивно выполнен следующим образом. Три точечных контакта располагались по вершинам равностороннего треугольника со сторонами, равными 50 *мкн*. Германиевый кристалл имел форму конического клина, контакты изготовлялись из тонких металлических пластин. Два точечных кон-



Фиг. 51. Схематическое изображение и внешний вид филдистора.

такта использовались как эмиттерные контакты, а третий точечный контакт являлся коллектором. Вывод управляющего электрода соединялся с основанием германиевого конуса.

Такой кристаллический тетрод использовался для преобразования частоты методом, аналогичным многосеточному методу преобразования в вакуумных лампах. На один из эмиттерных контактов подавалось напряжение сигнала, на второй—напряжение гетеродина, а в цепь коллектора включался резонансный контур, настроенный на промежуточную частоту. Непременным условием работы такого кристаллического смесителя-усилителя являлось требование, чтобы промежуточная частота была ниже граничной частоты кристаллического триода.

Используя такие кристаллические тетроды, оказывается возможным преобразовывать частоты сигналов до 200 *мггц*. Достоинством подобного кристаллического смесителя является возможность получить одновременно с преобразованием усиление сигнала на промежуточной частоте в 20—40 раз. При напряжении в цепи коллектора 30 *в* такие тетроды могут дать на выходе мощность порядка 5 *мвт* при токе в 1 *ма*.

Вторым вариантом кристаллического тетрода является слоистый тетрод, в который четвертый электрод вводится для улучшения частотных свойств кристаллического триода. Дополнительный электрод присоединяется к среднему слою слоистого триода на стороне, противоположной той, к которой присоединяется вывод управляющего электрода. На дополнительный электрод относительно управляющего электрода в триоде типа n-p-n подается смещение, равное —6 *в*. Такое включение позволяет снизить сопротивление управляющего электрода r_y с его обычной величины в 250 *ом* до 50—150 *ом*.

Для улучшения частотных свойств тетрода уменьшают толщину внутреннего слоя кристалла и снижают емкость коллектора путем уменьшения его площади.

Кристаллический тетрод, изготовленный таким образом, давал возможность получать усиление по мощности около 12 *дб* на частоте 50 *мггц*, что значительно выше граничной частоты слоистого кристаллического триода. При использовании такого тетрода в генераторе удавалось получить синусоидальные колебания до частоты 130 *мггц*. Полосовой усилитель, собранный на таком тетроде, давал на частоте 30 *мггц* усиление по мощности в 15 *дб* при полосе пропускания $2\Delta f = 9$ *мггц*.

20. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТРИОДОВ

Подводя итог рассмотрению свойств и областей применения кристаллических триодов, следует в первую очередь отметить, что применение кристаллических триодов далеко не ограничивается усилительными, импульсными и генераторными схемами.

Используя свойство германия изменять свою проводимость в зависимости от освещенности, оказалось возможным сконструировать кристаллический триод-фотоэлемент с максимальным отношением тока на свету к току в темноте, равным 20 : 1. Такой кристаллический триод может с успехом использоваться для воспроизведения оптической звукозаписи. Триоды-фотоэлементы способны давать на выходе до 0,5 *мвт/млм* и могут работать непосредственно на реле. Их граничная частота составляет около 200 *кгц*, а размеры приблизительно $15 \times 5 \times 5$ *мм*^{3}.

Имеются схемы микрофонных и звукоснимающих устройств, использующих принцип действия кристаллического

триода. Основная идея таких устройств состоит в использовании изменения параметров кристаллического триода при изменении силы давления контактной пружинки. Эмиттерная пружинка кристаллического коаксиального триода может быть механически связана тем или иным способом с мембраной микрофона или с граммофонной иглой звукоснимателя. Механические колебания эмиттерной пружинки преобразовываются в цепи эмиттера в электрические, а в цепи коллектора снимаются уже усиленные колебания. Такие микрофоны могут обеспечить бо́льшую выходную мощность и бо́льшую чувствительность, чем угольные микрофоны, при меньших шумах.

Возможно использование кристаллического триода в частотном модуляторе, где он выполняет функции своеобразной реактивной лампы, обеспечивая девиацию частоты в 1—4 *кгц* на основной частоте 1 *мггц* при коэффициенте нелинейных искажений, не превышающем 5%.

Кристаллические триоды показали ряд столь существенных преимуществ, что могут считаться серьезным конкурентом электровакуумных ламп в целом ряде областей радиотехники и приборостроения.

Схемы и устройства, имеющие большое количество ламп, потребляют большие мощности. Переход от вакуумных ламп к кристаллическим диодам и триодам в этих устройствах позволит в значительной степени снизить потребление мощности. Кроме того, с возрастанием числа ламп возрастает и вероятность отказа всего устройства из-за выхода из строя одной из ламп. Кристаллические триоды, имеющие значительно большие сроки службы, сокращают возможность таких случаев.

Малое потребление мощности кристаллических триодов делает их весьма перспективными для всякого рода переносной радиоаппаратуры, питающейся от аккумуляторов или батарей. Их малые размеры и малое потребление мощности позволяют создавать малогабаритные радиоустройства. Вес кристаллического триода приблизительно в 10 раз, а объем в 20 раз меньше, чем у стандартной вакуумной лампы.

Малые габариты и большой срок службы (70 000 час., что соответствует приблизительно восьми годам круглосуточной работы) допускают создание усилителей, которые могут быть вмонтированы в кабель, зарытый в землю или опущенный в воду.

В настоящее время найдены пути устранения недостат-

ков кристаллических триодов. Применение слоистых триодов позволило значительно снизить собственные шумы. Разброс параметров кристаллических триодов при изготовлении однотипной партии доведен в настоящее время до приемлемых значений в 20—25%.

Найдены пути и методы получения значительных выходных мощностей. Обеспечение выходной мощности в режиме непрерывной работы порядка 2—3 *вт* уже не представляет особой трудности. В настоящее время стало уже возможным создавать кристаллические триоды с выходными мощностями в десятки ватт при токах на выходе порядка 2—3 *а*.

Значительные трудности существуют пока в стабилизации параметров кристаллических триодов при изменении температуры. Однако и в этой области имеются существенные сдвиги.

Найдены способы в значительной степени поднять граничные частоты. Можно считать вполне достижимыми граничные частоты для кристаллических триодов порядка 150—300 *мггц*.

Можно предполагать, что в ближайшее время окажется возможным конструировать радиоаппаратуру, все каскады которой, включая выходные каскады передатчика и выпрямитель, будут работать на кристаллических диодах, триодах и тетродах.

Исключительно важное значение имеет способность схем с кристаллическими триодами работать при низких напряжениях источников питания.

Важными положительными свойствами кристаллических триодов являются также отсутствие вакуума, высокая механическая прочность и отсутствие микрофонного эффекта. Эти свойства допускают использование кристаллических триодов в аппаратуре, подвергающейся действию ударов и перегрузок.

Радиоустройства с кристаллическими триодами пока еще не позволяют использовать все их преимущества в отношении габаритов, потребляемых мощностей и питающих напряжений при условии получения столь же высокого качества работы, какое обеспечивают схемы на современных вакуумных лампах. Можно, однако, надеяться, что в будущем появятся многоэлектродные кристаллические устройства, обладающие значительно более высокими качествами, чем имеющиеся в настоящее время кристаллические триоды.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 3

Глава первая. **Физические основы и принцип действия кристаллического триода** 5

1. Проводимость полупроводников 5
2. Кристаллический триод с точечными контактами 10
3. Слоистый кристаллический триод 18

Глава вторая. **Эквивалентные схемы кристаллического триода** 20

4. Эквивалентная схема сопротивлений 22
5. Эквивалентная схема проводимостей 27
6. Кристаллический триод как усилитель с обратной связью 29

Глава третья. **Технические данные и характеристики кристаллических триодов** 30

7. Точечные кристаллические триоды 31
8. Слоистые кристаллические триоды 36
9. Шумы точечных кристаллических триодов 40

Глава четвертая. **Усилительные схемы** 47

10. Основные соотношения в усилительном каскаде 47
11. Устойчивость каскада с кристаллическим триодом 51
12. Элементы расчета усилительных схем 53
13. Варианты усилительных схем 60

Глава пятая. **Импульсные схемы с кристаллическими триодами** 69

14. Вольтамперные характеристики импульсных схем 71
15. Аналитический расчет вольтамперных характеристик входа 76
16. Некоторые практические импульсные схемы 83
17. Автогенераторы 84

Глава шестая. **Перспективы развития полупроводниковой техники** 86

18. Технология кристаллических триодов 86
19. Филдисторы и кристаллические тетроды 90
20. Перспективы развития и применения кристаллических триодов 93

Цена 2 р. 20 к.